RECHERCHES

SUR

LA CHAUFOURNERIE

FAITES AU PORT DE BREST,

PAR M. PETOT,

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES.

EXTRAIT DES ANNALES MARITIMES ET COLONIALES.



PARIS.

DE L'IMPRIMERIE ROYALE.

M DCCC XXXIII.

RECHERCHES

SUR

LA CHAUFOURNERIE

FAITES AU PORT DE BREST;

Colin Leuthall
1833

PAR M. PETOT,

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES.

EXTRAIT DES ANNALES MARITIMES ET COLONIALES.



PARIS.

DE L'IMPRIMERIE ROYALE.

M DCCC XXXIII.

AVERTISSEMENT.

Le service dont je suis chargé au port de Brest m'ayant fourni l'occasion d'étudier diverses questions de chaufournerie, M. le directeur Trotté de Laroche m'a engagé à coordonner mes recherches, et à les lui adresser sous forme de rapport. J'ai tâché de répondre à ses intentions bienveillantes en rédigeant ce mémoire. Il renferme, outre les résultats pratiques, beaucoup de développements théoriques, sujets sans doute à controverse; et je n'ose me flatter qu'ils soient exempts d'erreurs, mais on jugera si cet inconvénient n'est pas compensé par quelques avantages.

Voici, en peu de mots, le cadre qui m'était tracé et la marche que j'ai suivie.

Le principal problème à résoudre était celui de la forme et de l'emploi des fours à chaux. Trois chapitres

y sont consacrés. Dans le premier, j'examine le phénomène chimique de la calcination des pierres calcaires, et les causes qui facilitent ou retardent cette opération; ensuite les propriétés des combustibles et la manière de s'en servir. Dans le second, c'est à l'aide de données expérimentales, et de considérations sur l'écoulement des fluides élastiques, sur la température et le refroidissement de la flamme, que j'arrive à déterminer la forme qui convient aux fours à chaux, à subdiviser leur capacité en deux compartiments superposés, et à fixer sinon des grandeurs absolues, du moins des rapports et des limites de dimensions. La conduite d'un four de ce genre, la discussion de ses résultats, sa comparaison avec d'autres systèmes déjà connus, l'influence de l'eau réduite en vapeur, etc., sont le sujet du troisième chapitre.

La cuisson de la brique s'opère également avec succès dans les fours à compartiments superposés; mais il est nécessaire d'employer des précautions spéciales dans le mode de chargement et dans la conduite du feu. Le quatrième chapitre contient l'examen de chacune de ces questions. Il se termine par une note sur la cuisson du plâtre en moellon, dans un four à compartiment unique.

On prépare à Brest de la pouzzolane au moyen de gneiss décomposé. La méthode la plus simple consiste à le torréfier, à l'état pulvérulent, dans un four à réverbère; et cette méthode est le but du cinquième chapitre. Les principes généraux dont elle dérive y sont également exposés, et de plus ils sont accompagnés de quelques recherches sur l'influence du mode et de l'intensité du chauffage, et sur le rapport qui existe entre l'énergie des pouzzolanes et leurs principales propriétés physiques.

Dans le sixième chapitre, je traite de la préparation, de l'épreuve et de la revivification des plâtres-ciments; substances qu'on a confondues jusqu'à présent avec les chaux hydrauliques, tandis qu'elles en diffèrent par leurs propriétés comme par leur composition chimique, et forment un moyen terme entre ces chaux et les pouzzolanes.

Dans le septième chapitre, je résume en premier lieu diverses notions sur l'influence du degré de calcination de la chaux, sur sa conservation et sur son mélange avec les pouzzolanes; j'étudie ensuite ce qui se passe dans le phénomène de la solidification des mortiers à plâtre-ciment, chaux grasse ou hydraulique, avec ou sans pouzzolanes.

Quelques-uns de ces détails sont étrangers sans doute à l'art de la chaufournerie; mais ils servent de complément aux deux chapitres précédents.

Enfin, dans le huitième chapitre, je parle de l'apprêt de l'argile, du moulage et du séchage de la brique; de sa résistance à la rupture et à la gelée, eu égard au degré de cuisson et à la nature de la pâte.

Ce Mémoire a été adressé au Ministre de la marine, dès le mois d'octobre 1830, par M. le Directeur des travaux hydrauliques du port de Brest : sa publication, demandée par le Conseil des travaux de la marine, a été retardée jusqu'à ce jour par des circonstances indépendantes de la volonté de l'auteur.

RECHERCHES

SUR

LA CHAUFOURNERIE

FAITES AU PORT DE BREST.

CHAPITRE PREMIER.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA CALCINATION DES PIERRES CALCAIRES, ET SUR L'EMPLOI DES COMBUSTIBLES.

De la décomposition du sous-carbonate de chaux par la chaleur.

§ 1[er]. La pierre calcaire est un sous-carbonate de chaux, plus ou moins mélangé d'autres substances qu'il est inutile de spécifier en ce moment. Pour la rendre propre à la confection des mortiers, il faut la calciner, ou, autrement dit, la débarrasser par la chaleur de l'acide carbonique qu'elle contient. Elle perd alors environ les $\frac{4}{10}$ de son poids.

C'est au terme de la chaleur rouge que commence la décomposition. Durant ce phénomène, il s'établit une lutte entre deux forces moléculaires : l'une qui sollicite l'acide carbonique à passer à l'état gazeux, et l'autre qui le retient à la base calcaire. Cette dernière force augmente, comme toutes les affinités chimiques, à mesure que l'opération avance; si donc la température n'augmente pas en même temps, la force expansive du gaz sera bientôt équilibrée par son affinité pour la chaux, et il n'y aura plus de raison pour que cet équilibre soit rompu. Ainsi, on ne peut atteindre au résultat voulu en remplaçant l'intensité de la chaleur par la durée de son application.

D'autre part, la difficulté de la calcination est à peu près indépendante de la quantité d'acide restant à dégager; car n'y eût-il qu'un seul atome de gaz, pour lui donner une force expansive suffisante, il ne faudrait pas moins s'élever par tous les degrés successifs de température capables de produire une décomposition presque complète du carbonate pris à l'état ordinaire. Telle est l'interprétation d'un effet qu'on a beaucoup exagéré, en lui appliquant mal à propos ce dicton populaire : *On brûlerait une forêt entière avant d'achever une calcination interrompue.* Il s'agit alors non de ce qui arrive à un fragment calcaire isolé, car il y aurait à la fois erreur de fait et vice d'expression, mais de toute une fournée, abandonnée trop tôt par une circonstance quelconque. La question est donc tout à fait différente; elle se rattache, comme on le verra plus tard, à une cause purement mécanique.

Des causes qui retardent le dégagement de l'acide carbonique.

§ 2. A la difficulté de la décomposition chimique s'en joignent d'autres qui dépendent de la conductibilité et de l'état de division du calcaire. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

Un corps frappé extérieurement par la chaleur ne s'échauffe pas d'une manière uniforme dans toute sa masse. La transmission du calorique se fait de la surface vers le centre par un rayonnement de molécule à molécule, proportionnel aux différences de température entre les couches successives. La vitesse de cette transmission, qu'on nomme *conductibilité,* n'est pas la même pour tous les corps; elle est très-faible dans le carbonate de chaux; et sa valeur relative dans ce cas n'est pas, suivant M. Despretz, $\frac{1}{40}$ de celle de l'or. Si donc les fragments calcaires sont d'une épaisseur considérable, la différence de température entre le centre et la surface pourra être telle, que d'une part la calcination soit terminée, et que d'autre part elle soit à peine commencée. Pour la compléter,

il faudra conséquemment prolonger l'application de la chaleur, et même accroître son intensité.

En second lieu, à mesure que la décomposition se propage vers le centre, l'acide carbonique doit traverser des couches de plus en plus épaisses : cet obstacle peut être assimilé à une augmentation d'affinité, et exige de même une augmentation de force élastique ou de température.

De là vient que du calcaire, broyé en poudre ou à la grosseur d'une noix, n'a besoin d'être exposé que pendant une heure ou deux à un feu de forge; que, dans les fours à chaux ordinaires, on ne manque jamais de placer les blocs les plus volumineux dans les parties de plus vive incandescence; qu'enfin un même four, avec des calcaires de porosité ou de friabilité différente, conduit à des dépenses très-différentes en combustible et en durée de calcination.

La nature plus ou moins avantageuse du calcaire dépend des localités; sa réduction en petits fragments coûterait quelquefois plus en main-d'œuvre qu'elle n'économiserait en combustible : ainsi, on doit compter généralement que la température à produire dans un four est bien supérieure à celle qu'exige la décomposition moléculaire.

De l'influence accélératrice des hautes températures.

§ 3. Par cela même que la conductibilité des corps est imparfaite, la température de la pierre calcaire ne saurait être égale à celle du courant de flamme ou gaz chaud dans lequel elle est plongée, et qui varie d'un instant à l'autre. Il est aisé cependant de faire voir que, si l'on augmente progressivement cette dernière température, la première s'accroîtra suivant une autre progression plus rapide. En effet, d'après les recherches de MM. Dulong et Petit, un corps à la température θ, plongé dans un milieu gazeux à la température $\theta + t$, s'échauffe de telle manière qu'en appelant V la vitesse de la transmission, ou quantité de chaleur cédée dans l'unité de temps, on a

$$V = m\,a^{\theta}\left(a^{t} - 1\right) + n\,E^{0,45}\,t^{1,233}.$$

Dans cette équation, m et n sont des coefficients constants pour un même corps; $a = 1,0077$ pour tous les corps, et E exprime l'élasticité du milieu gazeux [1]. Des deux termes du second membre, le premier est relatif à la chaleur rayonnée, et le dernier à la chaleur transmise par contact immédiat; or, dans l'un l'excès de température t se trouve en exposant de a; dans l'autre il est affecté d'un exposant > 1; enfin, la température θ facilite elle-même le rayonnement, puisque θ est aussi en exposant de a; donc les valeurs du V augmentent bien plus rapidement que celles de $\theta + t$.

Le carbonate de chaux se décompose d'autant plus vite, que la force expansive de l'acide carbonique est plus considérable : or cette force expansive est directement proportionnelle à la température de la pierre; donc, en définitive, le propre des hautes températures de la flamme sera d'accélérer la calcination comme chauffage.

On verra plus loin que les mêmes circonstances sont favorables à l'effet utile du combustible employé. Malheureusement à côté de ces avantages se trouvent quelques inconvénients. Les considérations suivantes en fourniront la preuve.

De l'influence des corps argileux mêlés au calcaire.

§ 4. Les calcaires à chaux maigres ou hydrauliques sont mélangés de silice, d'alumine, de magnésie, d'oxide de fer, etc. Après la calcination, et même avant qu'elle soit complète, ces substances ne sont plus simplement mêlées, mais combinées avec la chaux, et solubles comme elle dans les acides. Il y a donc eu réaction chimique, ou affinité moléculaire, développée à une température plus faible que celle qu'on doit atteindre ordinairement. Mais alors l'argile, l'oxide de fer, etc., ayant de l'affinité pour la chaux, tendent par

[1] L'exposant de E change avec la nature du gaz; celui que nous avons donné, 0,45, se rapporte à l'air atmosphérique : il faudrait prendre 0,38 pour l'hydrogène, 0,517 pour l'acide carbonique, etc.

cela même à se substituer à l'acide carbonique, qui n'entre pour rien dans la nouvelle combinaison; ils ajoutent un effort à celui de la chaleur; ils accélèrent la calcination.

Au delà de ce terme, l'alumine, la magnésie, l'oxide de fer, pris ensemble ou isolément, ne paraissent pas avoir d'effet bien sensible sur la chaux; mais l'addition de la silice, même en très-petite dose, est une cause déterminante de *vitrification*. Quel que soit le degré d'avancement de cette vitrification, il n'en résulte pas moins une altération notable dans les qualités de la chaux : il importe donc, quand on emploie des calcaires argileux, de modérer à temps l'intensité de la chaleur. La forme du four rend souvent la chose difficile; mais, pour y suppléer, un moyen dont nous ferons usage, c'est de rafraîchir la flamme par un mélange de vapeur d'eau.

De l'action chimique de la vapeur d'eau.

§ 5. Cette vapeur jouit d'une propriété remarquable, mise hors de doute par une expérience déjà ancienne, et dont voici le détail.

Si l'on fait chauffer du calcaire, dans un tube disposé sur un fourneau de laboratoire de manière à pouvoir, d'un côté, recueillir les produits gazeux; et de l'autre, introduire au besoin de la vapeur d'eau, on reconnaît que, la pierre étant portée au rouge, et ne laissant pas échapper encore une seule bulle d'acide carbonique, la décomposition commence avec activité dès qu'on introduit de la vapeur, mais cesse aussitôt que la vapeur cesse, et recommence si de nouvelle vapeur arrive.

Le résultat de cette action est un hydrate de chaux décomposable lui-même par la chaleur. Si donc la vapeur n'est pas en assez grande quantité pour refroidir l'appareil, ou si l'incandescence est vivement soutenue, on n'a pas à craindre que la chaux mise à nu puisse fuser.

Ce déplacement de l'acide carbonique au moyen de l'eau semble contradictoire avec un fait qui se passe tous les jours sous nos yeux, c'est que la chaux des mortiers absorbe l'acide

carbonique de l'air et abandonne de l'eau. Mais il faut remarquer, avec M. Vicat, que l'acide carbonique ne parvient jamais à déplacer la portion d'eau qui constitue la chaux à l'état d'hydrate en proportions définies; et que, sous ce rapport, il existe une différence essentielle entre les carbonates régénérés et les carbonates naturels.

L'eau, pour se vaporiser, rend latent beaucoup de calorique; la vapeur à son tour en absorbe encore beaucoup, si on la met en contact avec un corps incandescent : des expériences seront donc nécessaires pour constater que cette double dépense n'excède pas l'économie signalée d'abord.

Classification des combustibles.

§ 6. Le rôle que les combustibles jouent dans la calcination conduit naturellement à rechercher quelles sont les températures qu'ils peuvent produire, et les circonstances qui conviennent le mieux à leur emploi et à leur effet utile. Pour cela, nous les grouperons en deux classes : la première comprenant le charbon de bois, le coke et quelques houilles sèches; la seconde comprenant les bois et les houilles grasses, c'est-à-dire les combustibles qui éprouvent toujours une distillation préalable, et donnent naissance non-seulement à de l'eau, mais surtout à des gaz carbonés susceptibles de s'enflammer au contact de l'air.

Des températures produites par la combustion du carbone.

§ 7. Les combustibles de la première classe sont du carbone presque pur; ils brûlent ordinairement sans flamme, et se convertissent en acide carbonique qui reste mêlé d'azote, et d'une proportion variable d'air atmosphérique. Que cette opération soit lente ou rapide, qu'elle ait lieu avec peu ou beaucoup d'air, si l'on refroidit jusqu'à la température initiale les gaz qui ont absorbé immédiatement toute la chaleur produite, il est admis comme principe, dans les recherches calorimétriques, que l'effet ne change pas. On a coutume de re-

présenter cet effet par le nombre de degrés dont 1 kilogramme de combustible peut élever la température de 1 kilogramme d'eau, abstraction faite de tout changement d'état et de chaleur spécifique. Chaque degré se nomme alors *unité de chaleur*, ou *calorie*. Pour passer ensuite de la température de l'eau à celle que prendrait, dans les mêmes circonstances, un poids donné de gaz, il suffit évidemment de la diviser par le produit de deux facteurs dont l'un est le poids des gaz et l'autre leur chaleur spécifique [1].

Cela posé, 1 kilogramme de charbon fournit, suivant M. Clément, 7050 calories : si la combustion se faisait au moyen d'oxigène pur, il n'en faudrait à la rigueur que 2^k65, donnant naissance à 3^k65 d'acide carbonique; la chaleur spécifique de ce dernier gaz est égale à 0,25, celle de l'eau étant prise pour unité; on aurait donc pour sa température

$$\frac{7{,}050}{0{,}25 \times 3{,}65} = 7730^o.$$

Mais si la combustion est alimentée avec de l'air atmosphérique, cette température baissera en raison de toute la chaleur nécessaire pour échauffer à un égal degré l'azote qui se trouve mêlé avec l'oxigène dans le rapport, en poids, de 79 à 21. Admettant donc pour l'azote la même chaleur spécifique que pour l'acide carbonique [2], et faisant attention qu'il faut alors $2^k65 + \frac{79}{21}\, 2^k65 = 12^k\,62$ d'air, on n'aura plus que

$$\frac{7050}{0{,}25\,(1 + 12{,}62)} = 2073^o.$$

[1] Nous savons, il est vrai, que pour les corps à l'état solide les chaleurs spécifiques paraissent n'être pas plus constantes que les dilatations ne sont uniformes : mais les dépendances mutuelles des molécules, leur force de cohésion variable, expliquent suffisamment ces différences. Pour les gaz, au contraire, où l'on admet généralement que les molécules sont dans un état d'indépendance et de mobilité très-grande, et où l'on a déjà vérifié l'exactitude de la loi de Mariotte, sur les dilatations, depuis 0° jusques à 300°, tout porte à croire que les chaleurs spécifiques restent constantes, au-delà comme entre ces mêmes limites.

[2] D'après Laroche et Bérard, la chaleur spécifique de l'eau étant prise

Si l'air n'est que demi-brûlé [1], comme il a la même chaleur spécifique que l'azote et l'acide carbonique, la température sera réduite à

$$\frac{7050}{0,25 \times 26,24} = 1075^o;$$

et ainsi de suite.

Conséquences relatives à l'effet utile.

§ 8. Ces exemples suffisent pour montrer combien le décroissement de température est rapide, à mesure que le poids de l'air employé est plus considérable; ils jettent même beaucoup de jour sur une autre question, celle de l'*effet utile*, ou autrement dit, de la quantité de chaleur que le corps à échauffer enlève aux gaz brûlés. Cette question est le but fondamental de la construction des fourneaux économiques. A-t-elle été convenablement résolue? C'est ce qu'il est facile d'apprécier. Presque tous les efforts ont abouti à prolonger par divers moyens le contact des chaudières avec les gaz, afin de les refroidir le plus possible; or, une pareille solution est au moins incomplète; l'essentiel encore c'est qu'on n'introduise pas d'air en pure perte dans le foyer. En effet, l'air

pour unité, celles des fluides élastiques que nous avons à considérer sont :

POUR l'acide carbonique.	POUR l'azote.	POUR l'oxigène.	POUR l'air atmosphérique.	POUR la vapeur d'eau.
0,2210	0,2754	0,2361	0,2669	0,8470

Les quatre premiers nombres différant très-peu, nous avons admis, comme suffisamment exacte et pour plus de simplicité, la moyenne 0,25.

[1] Le carbone n'étant pas le seul corps qui brûle avec l'oxigène de l'air et donne un produit gazeux, peut-être serait-il plus convenable de dire *air carburé;* mais l'expression *air brûlé* étant déjà usitée, nous avons cru pouvoir l'employer, en prévenant toutefois qu'il ne sera question ici que d'air dont l'oxigène est transformé, au moins partiellement, en acide carbonique.

demi-brûlé s'échappant à 200°, par exemple, ne fournit que 0,25 × 26,24 (1075 — 200) = 5739 calories par kilogramme de charbon, c'est-à-dire pas plus que l'air complétement brûlé refroidi seulement jusqu'à 387°,5, car on a également 0,25 × 13,62 (2073 — 387,5) = 5739 calories. Sans nul doute le but eût été rempli, et ce calcul ne ferait que le confirmer, si toutes les précautions qui tendent à augmenter le refroidissement des gaz sortants convenaient aussi pour rendre l'air plus complétement brûlé. Mais ces deux conditions ne sont pas toujours compatibles; et, dans chaque cas particulier, on doit chercher à établir leur concordance autant que possible.

Du mode d'emploi des charbons.

§ 9. Entrons à ce sujet dans quelques détails pour le cas des charbons, ou combustibles de la première catégorie. En principe, l'oxigène se combine d'autant plus facilement avec le carbone que celui-ci est à une température plus élevée, à un degré d'incandescence plus vive; donc toute cause qui favorise cette incandescence convient aussi pour augmenter la température de l'air brûlé. Cela posé, on remarque, 1° que le charbon incandescent émet beaucoup de chaleur rayonnante. Cette perte de chaleur est nuisible à l'effet utile et à la température produite; pour ce double motif, il importe donc que le foyer soit contenu dans une enveloppe peu conductrice, dans une maçonnerie épaisse, par exemple. Elle s'échauffe, il est vrai, aux dépens du combustible; mais n'ayant qu'une faible conductibilité, elle arrive bientôt à une température à peu près constante, et n'éprouve, par sa surface externe, qu'un rayonnement insensible. On remarque, 2° que chaque rechargement du foyer est suivi d'un abaissement de température proportionnel au dosage. Pour atténuer cet inconvénient, il suffirait sans doute de remplacer le combustible au fur et à mesure de la dépense, en procédant d'un mouvement continu, comme avec l'appareil connu sous le

nom de *grille tournante;* mais on y parvient plus sûrement, et on améliore l'effet utile, en introduisant le combustible par le canal d'écoulement de l'air brûlé, et en le stratifiant, si les circonstances le permettent, par couches alternatives avec les corps à échauffer. De cette manière les parties supérieures, à mesure qu'elles descendent vers le foyer, recueillent de la chaleur qui eût été perdue en grande partie, et deviennent incandescentes avant que la combustion les atteigne.

Avec les charbons, la pierre calcaire se prête aisément au chauffage par voie de stratification; mais elle ne pourrait être soumise sans danger au système des foyers isolés. En effet, les fragments calcaires les plus rapprochés du foyer, faisant l'office d'écran, arrêteraient toute la chaleur rayonnante et seraient vitrifiés avant que les autres fussent arrivés au terme convenable de calcination.

Une dernière question d'une haute importance est celle qui tient à l'influence du tirage ; nous y reviendrons plus tard.

Des températures produites par les combustibles à flamme.

§ 10. Un ordre différent de phénomènes se présente dans l'emploi des combustibles de la deuxième catégorie. Ils sont formés, en proportions variables, de carbone, d'hydrogène, d'eau à l'état de combinaison, et d'eau simplement interposée. Ils peuvent se convertir presque intégralement, par la combustion, en eau et en acide carbonique. Mais alors c'est quelquefois la moindre partie de leur carbone qui brûle immédiatement par le contact de l'air; l'autre commence d'abord par réagir sur les éléments avec lesquels elle était combinée, et donne lieu à plusieurs produits gazeux, tels que l'hydrogène carboné et l'oxide de carbone : ceux-ci se combinent à leur tour avec l'oxigène de l'air; et, de cette combinaison et de la présence simultanée d'une petite dose de carbone entraîné par le courant des gaz, ou déposé à l'état de ténuité

extrême par l'hydrogène percarboné, il résulte une flamme longue et d'un éclat remarquable.

Quelque soin qu'on apporte dans la construction et l'alimentation des foyers, il est presque impossible de ne pas laisser échapper une certaine proportion de carbone et de gaz combustibles, sous forme de fumée; il ne serait guère plus facile de tenir compte de la valeur calorifique ainsi perdue : faisant donc abstraction de cette imperfection de foyers, nous admettrons, dans les calculs d'effets comparatifs, qu'on est parvenu à n'avoir plus que de l'air brûlé et de la vapeur d'eau. Cela posé, si ces résidus se développent d'une manière uniforme, leur température s'obtiendra en divisant la valeur calorifique du combustible par la somme des produits partiels du poids de chaque espèce de gaz par sa chaleur spécifique; et on aura par exemple,

Pour le *ligneux*, composé de 0,52 de carbone et 0,48 d'eau :

L'air étant complétement brûlé,

$$\frac{0,52 \times 7050 - 0,48 \times 550 \ ^{1}}{0,48 \times 0,85 + 0,25 \times 0,52 \times 13,62} = \frac{3402}{2,178} = 1562^{\circ};$$

L'air étant demi-brûlé,

$$\frac{3402}{2,178 + 0,25 \times 0,52 \times 12,62} = \frac{3402}{3,818} = 891^{\circ}.$$

Pour la *houille de Newcastle*, composée, suivant M. Karsten, de 0,8499 de carbone, 0,1325 d'eau et 0,0176 d'hydrogène :

L'air étant complétement brûlé,

$$\frac{0,8499 \times 7050 + 0,0176 \times 22125 - (0,1325 + 9 \times 0,0176)\,550 \ ^{2}}{0,85 \times 0,1325 + 0,25 \times 0,8499 \times 13,62 + 0,85 \times 9 \times 0,0176 + 0,25 \times 8 \times 0,0176 \times \frac{79}{21}}$$

$$= \frac{6221}{3,27} = 1902^{\circ};$$

[1] Le second terme du numérateur exprime la chaleur latente de la vapeur d'eau, prise aux dépens de la valeur calorifique du carbone.

[2] Le nombre 22125 exprime la valeur calorifique de 1^{k} d'hydrogène; le

L'air étant demi-brûlé,

$$\frac{6221}{3,27+0,25\times 0,8499\times 12,62+0,25\times 8\times 0,0176\left(1+\frac{79}{21}\right)}=\frac{6221}{6,12}=1016^\circ.$$

Pour le *bois*, abstraction faite de la cendre, et après un an de coupe, c'est-à-dire contenant environ $\frac{1}{5}$ de son poids d'humidité :

L'air étant complétement brûlé,

$$\frac{0,52\times 0,80\times 7050-(0,20+0,48\times 0,80)\,550}{(0,20+0,48\times 0,80)\,0,85+0,25\times 0,52\times 0,80\times 13,62}=\frac{2611,6}{1,913}=1365^\circ;$$

L'air étant demi-brûlé,

$$\frac{2611,6}{1,913+0,25\times 0,52\times 0,80\times 12,62}=\frac{2611,6}{3,226}=810^\circ.$$

Enfin, pour le *bois vert*, contenant à peu près $\frac{4}{10}$ de son poids d'humidité :

L'air étant complétement brûlé,

$$\frac{0,52\times 0,60\times 7050-(0,40+0,48\times 0,60)\,550}{(0,40+0,48\times 0,60)\,0,85+0,25\times 0,52\times 0,60\times 13,62}=\frac{1821,2}{1,645}=1107^\circ;$$

L'air étant demi-brûlé,

$$\frac{1821,2}{1,645+0,25\times 0,52\times 0,60\times 12,62}=\frac{1821,2}{2,628}=693^\circ.$$

Ces nombres font voir combien l'eau, interposée ou combinée au carbone, fait décroître la température des gaz. Elle n'apporte rien en valeur calorifique, tandis qu'elle dépense beaucoup, en raison de sa chaleur latente pour passer à l'état de vapeur, et de sa chaleur spécifique pour se mettre en équilibre de température avec l'air brûlé. Nous aurons donc à examiner, entre autres choses, comment on peut s'en débarrasser avec la moindre perte possible.

terme 9 × 0,0176 est relatif à l'hydrogène, qui absorbe, en brûlant, huit fois son poids d'oxigène. Enfin le dernier terme du dénominateur est relatif à l'azote qui accompagne l'oxigène converti en acide carbonique.

De la proportion de carbone qui brûle sans être transformée préalablement en gaz carbonés.

§ 11. On le prévoit aisément, l'étude du mode d'emploi des combustibles à flamme est bien plus compliquée que celle des combustibles de la première catégorie. Aussi, afin qu'on saisisse mieux leur but et leur liaison, voici d'abord le résumé des questions qui vont être traitées :

1° Quelle est la portion de carbone qui brûle sans être transformée préalablement en gaz carbonés ; et comment varie-t-elle suivant les circonstances ?

2° Quel est l'ordre dans lequel apparaissent les produits aqueux de la distillation, et comment la température et l'état de division du combustible influent-ils sur ce phénomène ?

3° Quels sont, d'après cela, les avantages d'isoler le combustible d'avec les corps à échauffer, d'alimenter le foyer par fortes doses à la fois, et enfin d'avoir un tirage très-actif ?

Commençons par la première de ces questions.

Nous extrayons d'un mémoire sur les combustibles, par M. Karsten, le tableau suivant :

ESPÈCES de combustibles employés.	RÉSIDUS OBTENUS POUR 100 PARTIES DE MATIÈRE.			
	Par une distillation lente.		Par une distillation rapide.	
	Charbon.	Cendre.	Charbon.	Cendre.
Jeune chêne......	25,45	0,15	16,39	0,15
Vieux *idem*.......	25,60	0,11	15,80	0,11
Jeune hêtre.......	25,50	0,375	14,50	0,375
Vieux *idem*.......	25,75	0,40	13,75	0,40
Jeune charme.....	24,90	0,32	12,80	0,32
Vieux *idem*.......	26,10	0,35	13,30	0,35
Jeune bouleau....	24,80	0,25	12,80	0,25
Vieux *idem*.......	24,40	0,30	11,90	0,30
Jeune sapin (*epicea*)	25,10	0,15	14,10	0,15
Vieux *idem*.......	24,85	0,15	13,90	0,10
Aulne...........	25,30	0,35	14,10	0,35
Tilleul..........	24,20	0,30	12,90	0,30
Fougère.........	25,20	2,75	14,25	2,75
Tiges de roseaux...	24,75	1,70	12,95	1,70
Paille de seigle....	24,30	0,30	13,10	0,30

Tous ces combustibles étaient préalablement réduits en copeaux minces, et parfaitement desséchés à l'air pendant plusieurs jours, à une température d'environ 15°.

A l'inspection de ce tableau, on reconnaît, 1° que toutes les espèces de bois donnent à peu près un égal résidu en charbon, quand on les traite dans des circonstances semblables; et que les différences, s'il en existe, sont plutôt accidentelles que dues aux différences mêmes de texture ou de densité; 2° que ces résidus varient du simple au double, suivant que la distillation est rapide ou lente; qu'ainsi la première manière d'opérer est la plus favorable au développement des produits gazeux susceptibles de s'enflammer.

Quant aux houilles, les plus fortes variations de résidu ne vont guère, suivant M. Karsten, au delà de $\frac{6}{100}$ de leur poids; il suffit donc d'avoir égard aux résultats obtenus par la distillation lente. Dans l'ouvrage déjà cité, M. Karsten rapporte de nombreuses expériences sur ce sujet : leur examen nous a conduit à une règle générale pour déterminer le résidu avec une grande approximation, quand on connaît la composition chimique de la houille; nous allons indiquer cette règle.

L'eau interposée se dégage par la simple dessiccation; l'eau combinée absorbe la moitié de son poids de carbone, et l'hydrogène quatre fois et demie.

Par exemple, la houille de Kilkenny, connue sous le nom de *cannelcoal,* contient, après dessiccation complète :

Carbone 74,47, cendre 0,05, eau combinée 22,06, hydrogène 2,97; elle perdra donc en carbone, par la distillation lente,

$$\tfrac{1}{2} \times 22,06 + 4,5 \times 2,97 = 24,39;$$

ce qui suppose un résidu de 74,47 — 24,39 = 50,58 (M. Karsten indique 51,82)[1].

Cette houille étant l'une des plus grasses que l'on puisse

[1] Un seul exemple ne prouve rien pour la justesse d'une règle; mais en voici d'autres qui la confirment, et qui apprennent en même temps que c'est à la présence et à la proportion de l'hydrogène que les houilles doivent leur

citer, on en conclut que toutes donneront beaucoup moins de flamme que le bois, et se rapprocheront ainsi des combustibles de la première catégorie.

De l'ordre dans lequel apparaissent les produits aqueux de la distillation.

§ 12. Les produits gazeux et liquides de la distillation forment le complément du résidu en charbon; nous n'avons donc plus à nous occuper de leur poids total, mais seulement de leur nature, et de l'ordre dans lequel ils apparaissent.

Quand on soumet le bois à la distillation en vase clos, de manière à recueillir et fractionner tous les produits, sans les laisser brûler au contact de l'air, on obtient de l'eau, de l'acide carbonique, de l'acide acétique, de l'oxide de carbone, de l'huile empyreumatique, de l'hydrogène carboné et même de l'hydrogène pur. Alors, suivant les expressions mêmes de M. Thénard, l'eau et l'acide carbonique, qui sont très-oxigénés, se forment les premiers; le gaz oxide de carbone et l'acide acétique, qui le sont moins, se forment en second lieu; l'huile qui ne l'est que peu, et le gaz hydrogène carboné, qui ne l'est pas, ne se forment

propriété de donner, par la distillation, un coke pulvérulent, fritté ou boursouflé.

DÉSIGNATION des espèces de combustibles.	CARBONE.	CENDRE.	EAU COMBINÉE.	HYDROGÈNE.	RÉSIDU donné par l'expérience.	RÉSIDU donné par le calcul.
Houille de Newcastle, à coke boursouflé	84,26	0,86	13,12	1,75	69,54	70,69
Idem de Saarbruck, à coke peu boursouflé	81,32	1,00	16,28	1,40	67,07	67,56
Idem de Brzenkowitz, à coke pulvérulent	73,88	2,88	23,03	0,21	61,5	64,30
Ligneux pur	52,00	0,00	48,00	0,00	//	28,00
Bois de hêtre	51,45	//	48,06	0,49	25,50 25,75	25,21

qu'en dernier lieu. On peut enfin avoir une idée des quantités relatives de ces produits, d'après l'expérience suivante de de Th. Saussure, faite avec du bois de chêne.

Pour 100 grammes de matière:

Gaz hydrogène carboné (et probablement oxide de carbone ?).	21l,60
Acide carbonique	5 ,42
Eau, acide acétique et un peu d'huile	40g,04
Huile empyreumatique	5 ,55
Charbon	21 ,01
Cendres	0 ,25

D'après cela, ce sont les produits les plus oxigénés, et par conséquent les moins inflammables, les moins riches en valeur calorifique, qui apparaissent les premiers et en quantité très-notable. Mais toutes les circonstances ne sont pas également favorables pour arriver à ce résultat: ainsi, 1° les bois menus ou de branchages, les bois refendus et légers sont, sous ce rapport, bien supérieurs aux bois de fortes dimensions; parce que dans ces derniers, en raison de leur faible conductibilité, la distillation ne se propage que lentement de la surface vers le centre, certaines parties achèvent de se décomposer quand d'autres commencent à peine, et on obtient simultanément des produits de toute espèce. 2° La température à laquelle on opère a encore une grande influence: en effet, l'eau, l'acide carbonique, l'acide acétique et l'huile, en contact avec du carbone, à un haut degré de chaleur, se convertissent en hydrogène carboné et en oxide de carbone; aussi, comme nous avons eu occasion de le dire précédemment, le résidu en charbon peut diminuer de moitié. Mais alors tous les produits de la distillation sont devenus combustibles, les parties purement aqueuses sont dissoutes dans les autres, et il n'y a plus moyen de les isoler.

Dans les houilles, les éléments de l'eau combinée se trouvant, de la même manière que dans le bois, en contact avec du carbone, à l'état de gaz naissants, donnent les mêmes espèces et les mêmes quantités relatives de produits gazeux ou liquides; et de plus, chaque gramme d'hydrogène forme

environ 8 litres de gaz [1]. Mais les variations dépendant de la température et de l'état du combustible ont beaucoup moins d'importance, par cela même que l'on conserve à peu près une valeur calorifique constante dans le résidu, et que la proportion d'hydrogène et d'eau combinée est toujours assez faible, dans les houilles les plus grasses comme dans les houilles ordinaires.

[1] Cette dernière indication est d'un haut intérêt pour le choix des houilles propres à l'éclairage; elle se rattache à la connaissance de cet autre fait qu'il se dégage, par la distillation, de l'hydrogène pur. Voici le calcul dont nous l'avons déduite.

La densité de l'air étant prise pour unité, on a :

Pour la densité de l'hydrogène carboné de la houille (Philipps et Faraday), 0,43 au plus;
Pour celle de l'hydrogène pur.................... 0,0688 ;
Pour celle de l'hydrogène protocarboné............ 0,555 ;
Pour celle de l'hydrogène percarboné.............. 0,978.

La chimie n'ayant pas admis jusqu'à présent l'existence d'une nouvelle espèce d'hydrogène moins carboné, à proportions définies, que celui qui a été désigné tout à l'heure sous le nom d'*hydrogène protocarboné*, le gaz de la houille ne doit être considéré que comme un mélange d'hydrogène pur et d'hydrogène protocarboné ou percarboné. Il est possible de déterminer non-seulement les proportions de ce mélange, mais encore celle des deux espèces d'hydrogène carboné qui en fait partie principale.

Pour cela, rappelons d'abord que le poids de 1 lit. d'air est $1^{gr},298$: on aura pour un égal volume

De gaz de la houille... $0,43 \times 1,298 = 0^{gr},56$;
D'hydrogène pur..... $0,0688 \times 1,298 = 0,089$;
D'hydrogène protocarb. 2 lit. d'hydrog. pur + 3 fois leur poids de carbone;
D'hydrogène percarbon. 2 *idem*......... + 6 *idem*.

Admettons ensuite le cas du mélange de l'hydrogène pur avec l'hydrogène percarboné, et cherchons combien il y a, dans un litre de gaz de la houille, d'hydrogène libre, d'hydrogène combiné et de carbone.

Soient x le volume d'hydrogène libre, et y celui de l'hydrogène carboné, on aura les relations

$$0,089 \times x + 14 \times 0,089 \times y = 0,56,$$

$$x + y = 1 ;$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{14 \times 0,089 - 0,56}{13 \times 0,089} = 0^{lit},5929 ,$$

et

$$y = 1 - x = 1 - 0,5929 = 0^{lit},4071 ;$$

donc, à cause de la contraction qui résulte de la combinaison, il entre,

Du mode d'emploi des combustibles à flamme.

§ 13. Avec le charbon, le coke ou les houilles sèches, les gaz brûlés atteignent tout d'abord leur plus haute température, et se refroidissent à mesure qu'ils s'éloignent du combustible; avec les bois et les houilles grasses, au contraire, la combustion se continue bien au-delà des surfaces de contact, et la température n'arrive à son maximum qu'à la fin de cette combustion. Dans le premier cas, le chauffage par voie de stratification est le plus convenable; dans le second, il faut un foyer distinct au-dessous du corps à échauffer, parce que, si l'on refroidit trop tôt les gaz de la distillation, leur température ne

dans ce dernier volume, $2\ y = 0^{lit},8142$ d'hydrogène pur, et par suite $6 \times 0,8142 \times 0,089 = 0^{gr},4347$ de carbone.

En prenant le rapport de ce poids de carbone à celui de tout l'hydrogène, libre et combiné, il viendra :

$$\frac{6 \times 0,8142 \times 0,089}{(0,5929 + 0,8142)\ 0,089} = \frac{4,8852}{1,4071} = 3,47\ ;$$

c'est-à-dire que, dans la distillation de la houille, 1 gr. d'hydrogène absorbe $3^{gr},47$ de carbone, qui produisent $\frac{1 + 3,47}{0,56} = 8$ litr. de gaz. Appliquant cette règle aux houilles dont nous avons donné l'analyse, on trouvera :

Pour 100^{gr} de houille de Kilkenny $21^{lit},60 \times \frac{22,06}{48} + 2,97 \times 8^{lit} = 33^{lit},68$;

Idem de Newcastle............ $21\ ,60 \times \frac{13,12}{48} + 1,75 \times 8 = 19\ ,90$.

Or, dans les établissements d'éclairage au gaz on retire, suivant M. Clément, $30^{lit},9$ dans les premiers cas, et $18^{lit},5$ dans le second ; l'accord est donc aussi grand qu'on puisse le désirer.

Si, au contraire, on avait supposé que le gaz de la houille fût un mélange d'hydrogène libre et d'hydrogène protocarboné, en répétant la même série de calculs que tout à l'heure, on n'eût trouvé, pour 1 gr. d'hydrogène, que $6^{lit},4$ de gaz, nombre inférieur à ce qu'on obtient réellement. On sait enfin que le gaz de la houille donne une flamme blanche, et laisse, en brûlant, déposer du carbone; propriétés que ne possède pas l'hydrogène protocarboné. Ce dernier gaz ne peut donc exister dans le mélange, sinon en très-petite proportion.

reste plus assez élevée pour qu'ils s'enflamment en rencontrant de l'oxigène. Il importe également d'envelopper le courant de gaz de parois peu conductrices; parce qu'elles arrivent promptement à l'incandescence, facilitent la combustion et rendent ainsi le foyer plus *fumivore*.

Ces dispositions appliquées à la calcination de la pierre calcaire présentent peu d'inconvénients avec les bois, dont les $\frac{75}{100}$ environ se convertissent en produits gazeux; mais il n'en est pas de même avec les houilles grasses, qui donnent trop de brasier pour que leur chaleur rayonnante ne soit pas dangereuse. Ces houilles ne peuvent d'ailleurs être employées par voie de stratification, à cause de leur propriété de se boursoufler et d'empâter; elles doivent donc être ou réduites préalablement en coke, ou conservées pour d'autres usages.

Avec les combustibles de la première catégorie, le foyer doit être rechargé d'un mouvement continu; avec ceux de la seconde, au contraire, il doit l'être par intermittence et par fortes doses à la fois. Par ce dernier mode d'alimentation, on a d'abord beaucoup de fumée et une température peu élevée, à cause de l'ordre d'apparition et de la prédominance des produits aqueux et non combustibles; mais ensuite les produits carbonés donnent une température bien supérieure à celle qui serait résultée d'une distillation uniforme, à cause de la grande différence de chaleurs spécifiques entre la vapeur d'eau et les gaz permanents. De là un autre avantage manifeste, un accroissement d'effet utile; car la première portion de flamme, chargée de vapeur d'eau, ne cédant que très-peu de chaleur, peut-être même en prenant au calcaire, s'il est incandescent, doit être considérée comme s'échappant dans l'atmosphère avec le moindre excès possible de température, et par suite, comme nuisant le moins possible à la valeur calorifique du combustible. En même temps la seconde portion de flamme rentre dans les conditions les plus favorables pour céder une grande quantité de chaleur au calcaire; puisque, suivant les lois de MM. Dulong et Petit, cette quantité augmente en progression

géométrique pour des différences de températures en progression arithmétique [1].

Toutefois cette dernière conséquence suppose que la diminution de durée du contact avec le calcaire, ou autrement dit, que la vitesse d'écoulement d'un poids donné de gaz n'est pas soumise à une loi d'accélération aussi considérable ; car on perdrait d'un côté ce qu'on aurait gagné de l'autre. Nous dissiperons tous les doutes à ce sujet, en exposant les propriétés générales des foyers.

L'alimentation par intermittence est indispensable avec les bois humides ; elle est très-avantageuse avec les bois refendus, ou à l'état de branchages ; enfin, c'est sur les bois de fortes dimensions qu'elle agit avec le moins d'efficacité. Ces propositions résultant de développements déjà connus, nous n'y insisterons pas davantage.

De l'influence du tirage.

§ 14. En général, il n'y a pas lieu de tenir compte de la température avec laquelle l'air arrive au combustible ; c'est la même que celle qui règne à l'extérieur du foyer. Il est possible cependant, et nous en montrerons plus d'un exemple, que l'air soit échauffé préalablement par de la chaleur qui eût été perdue sans cette circonstance : cela revient alors à augmenter d'autant la valeur calorifique du combustible, à le maintenir à une plus haute température, et par suite à faciliter la réaction de l'oxigène.

Quant au tirage, il varie d'une forme de foyer à l'autre,

[1] Voici un exemple qui vient à l'appui de ces considérations. Nous avons fait construire des fourneaux économiques pour les grandes chaudières à soupe du bagne de Brest; l'un de ces fourneaux, servant déjà depuis plusieurs jours, fut mis en expérience pour constater le meilleur mode d'alimentation du foyer, et donna :

1° Charge du foyer, 30 kil. de bois; temps nécessaire pour arriver à l'ébullition, 2 heures; dépense totale en combustible, 63 kil.;

2° Charge du foyer, 18 kil. de bois; temps nécessaire pour arriver à l'ébullition, 2 heures 1/2; dépense totale en combustible, 74 kil.

souvent même pour des modifications à peine sensibles : il importe donc d'apprécier jusqu'à quel point ces variations peuvent influer sur la combustion.

Quand le tirage se fait avec une grande vitesse, l'air est chassé contre le combustible comme par un soufflet : en parcourant les interstices de la charge, il se dissémine de tous côtés par le choc ; en même temps les points de contact avec le brasier sont plus intimes, et multipliés indéfiniment ; la combustion de ce brasier est accélérée par cela même ; et les produits de la distillation, se trouvant mêlés avec l'air plus promptement et à une plus haute température initiale, s'enflamment avec facilité, et plus intégralement. Aussi, pour qu'un foyer soit fumivore, il ne suffit pas qu'il présente aux gaz carbonés des parois peu conductrices et incandescentes, il faut encore un certain tirage ; et maintes fois nous avons eu occasion de constater qu'un foyer construit avec beaucoup de soins restait complétement fumivore, ou cessait de l'être, suivant la manière dont on réglait l'admission de l'air.

Ajoutons cependant que le tirage qui suffit pour un combustible ne suffit pas nécessairement pour tout autre ; que plus un combustible brûle facilement, moins il est nécessaire d'augmenter le tirage ; que par exemple, les bois de branchage en exigent moins que les gros bois, les houilles grasses moins que les houilles sèches : et cette question, de déterminer le degré de tirage convenable dans chaque cas particulier, n'est pas sans importance ; car, il est bien évident que plus les gaz chauds s'écoulent promptement, plus la transmission de calorique au corps à échauffer est incomplète, de sorte qu'il peut arriver que l'effet utile ne change pas, peut-être même qu'il diminue. Mais, en résumé, il n'est pas moins vrai de dire qu'une bonne combustion est inséparable d'un bon tirage.

CHAPITRE II.

DE LA FORME ET DES DIMENSIONS LES PLUS CONVENABLES POUR LES FOURS CHAUFFÉS PAR LE BOIS.

Des fours chauffés par la houille.

§ 15. Les combustibles que nous venons d'examiner ont été rangés en deux classes : les uns doivent brûler en contact avec le calcaire, et les autres dans un foyer isolé. De là deux espèces bien distinctes de fours.

Ceux de la première espèce, où l'on stratifie couche par couche le combustible avec le calcaire, peuvent se recharger indéfiniment de la même manière, tandis que par la partie inférieure on retire les produits, au fur et à mesure qu'ils sont calcinés : on les nomme, pour cette raison, *fours à feu continu*. Leur vide intérieur ressemble ordinairement à un demi-ellipsoïde, ou à un tronc de cône posé sur sa plus petite base ; et cet arrangement tient surtout à la facilité qui en résulte de tirer la chaux par faible quantité à la fois, sans ébranler toute la masse, que l'inclinaison des parois soutient et laisse descendre peu à peu.

Ces fours peuvent être chauffés indistinctement avec du charbon de bois, du coke, de l'anthracite, ou des houilles maigres. Leur marche est sujette à quelques inconvénients ; mais, pour les éviter, il faut plutôt de l'habitude et de l'adresse de la part du chaufournier, que des modifications dans la forme des parois. Ce motif eût suffi, sans doute, pour attirer toute notre attention ; mais l'usage de la houille ou du charbon, au port de Brest, était chose trop dispendieuse pour nous permettre de faire les expériences nécessaires.

Des fours chauffés par le bois.

§ 16. Les fours dans lesquels le bois est employé peuvent être à feu continu ou discontinu. Dans le premier cas, il suffit d'échauffer l'enveloppe une fois pour toutes, et il y aurait

avantage évident sur le second cas, si les autres circonstances restaient égales des deux côtés. Mais ces fours exigent que le calcaire soit réduit en petits fragments de volume à peu près uniforme ; opération très-longue, par exemple, avec le calcaire compacte de Brest. Ils exigent aussi que non loin du foyer on laisse des ouvertures pour retirer la chaux calcinée ; or ces ouvertures, quoi qu'on fasse, laissent passer beaucoup d'air froid. Ils sont d'ailleurs inapplicables à la cuisson de la brique. En définitive, mais sans rien préjuger sur les améliorations dont ils sont peut-être susceptibles, nous avons pensé que, dans la position particulière où nous nous trouvions, ils ne présentaient pas assez de chances de succès pour être essayés de préférence aux fours à feu discontinu, et nous nous sommes borné à l'étude de ces derniers.

Ainsi restreinte, la question est encore susceptible de longs développements. En voici un aperçu :

1° Propriétés générales, ou théorie des foyers ;

2° Courbure à donner aux parois du four, pour la répartition uniforme de la chaleur dans les diverses parties d'une même section horizontale, prise à une hauteur quelconque ;

3° Chauffage dans le sens vertical du four, et division de sa capacité en compartiments superposés, et munis chacun d'un foyer ;

4° Examen circonstancié des systèmes de fours ordinaires ;

5° Enfin, grandeur et arrangement des diverses parties des nouveaux fours.

Tel est en même temps l'ordre qui va être suivi dans ce chapitre.

De l'écoulement des gaz chauds.

§ 17. Quand un courant de gaz chauds, maintenu par un canal à parois cylindriques, s'élève dans l'atmosphère, c'est en vertu de l'excès de poids d'une colonne d'air froid de même base et de même hauteur, avec laquelle on peut le concevoir réuni comme par un tube recourbé, de manière à faire syphon. Sa vitesse à l'orifice supérieur du canal devient uniforme

presque aussitôt que l'écoulement commence, et se déduit de la formule connue pour la chute des corps graves, $V = \sqrt{2gh}$, où g représente la vitesse acquise au bout de la première seconde de temps, c'est-à-dire 9,^{m}81, et h l'excédant de hauteur que prendrait la colonne d'air froid, en passant à la température et à la densité des gaz chauds.

La vitesse multipliée par la section de l'orifice donne le volume écoulé dans 1″; l'équivalent de ce volume doit passer en même temps par toute autre section du canal; donc, puisque le canal est supposé cylindrique, la vitesse y sera la même qu'à l'orifice.

Toutefois le calcul ne s'accorde avec l'expérience qu'autant que l'on tient compte des frottements. Dans les cheminées ordinaires, par exemple, on a reconnu que la vitesse moyenne était environ le $\frac{1}{5}$ de la vitesse théorique: mais ce coefficient numérique est trop simple pour être autre chose qu'un cas particulier d'un phénomène très-compliqué.

En effet, le frottement dépend de la nature des gaz et de celle des parois; il est, suivant M. d'Aubuisson, proportionnel au carré de la vitesse, à la première puissance de la longueur du canal; et en raison inverse de son diamètre. D'autre part, M. Péclet a déduit de ses nombreuses expériences sur l'air chaud *non altéré,* que, si l'on représente par K le rapport de la vitesse réelle à la vitesse théorique, on a, en appelant D le diamètre du canal, et L sa longueur:

Pour des parois en terre cuite.. $K_1 = 2{,}06 \sqrt{\frac{D}{L + 4D}}$;

Idem en tôle............... $K_2 = 3{,}25 \sqrt{\frac{D}{L + 10D}}$;

Idem en fonte.............. $K_3 = 4{,}61 \sqrt{\frac{D}{L + 20D}}$.

Enfin, on passe de ces valeurs à celles qui conviennent pour l'air brûlé, en les multipliant par la racine carrée du rapport des densités, c'est-à-dire par $\sqrt{\frac{12{,}62}{13{,}62}} = 0{,}962$ pour

l'air complétement brûlé, et par $\sqrt{\frac{25,24}{26,24}} = 0,980$ pour l'air demi-brûlé.

Formule fondamentale de la théorie des foyers.

§ 18. Ces principes étant posés, cherchons la relation qui existe entre la température des gaz brûlés s'échappant d'un foyer dans l'atmosphère, et le poids des mêmes gaz, écoulé dans l'unité de temps. Pour cela, soient :

t La température moyenne des gaz brûlés;
y Le poids de ces gaz, écoulé dans 1″;
V Leur vitesse d'écoulement;
δ Leur densité à la température t;
Δ Leur densité à 0°, celle de l'air étant prise pour unité;
B La section du canal d'écoulement;
H La hauteur de ce même canal;
α Le coefficient de la dilatation des gaz pour 1° centigrade, (il est égal à 0,00375.)

On aura évidemment :

$$y = \delta \times V \times B \qquad (1).$$

mais la densité δ est en raison inverse du volume des gaz ; de sorte que si elle est Δ à 0°, elle sera à t° :

$$\delta = \frac{\Delta}{1+\alpha t} \qquad (2).$$

On sait, d'autre part, que la vitesse V est donnée par la formule $V = K\sqrt{2gh}$; qu'en outre, une colonne d'air froid H, en passant de 0° à t°, prend une hauteur $H(1+\alpha t)$, et une densité $\frac{1}{1+\alpha t}$: en réduisant cette nouvelle hauteur à la densité δ, elle deviendra $H(1+\alpha t)\frac{\frac{1}{1+\alpha t}}{\delta} = \frac{H}{\delta} = \frac{H(1+\alpha t)}{\Delta}$;

donc, si l'on en retranche la colonne de gaz brûlé H, on aura $h = \frac{H(1+\alpha t)}{\Delta} - H = \frac{H}{\Delta}(1+\alpha t - \Delta;)$ et par suite :

$$V = K\sqrt{2g\frac{H}{\Delta}(1+\alpha t - \Delta)} \qquad (3).$$

Éliminant δ et V des relations (1), (2) et (3), il viendra :

$$(1+\alpha t)\,y\,K\,B\sqrt{2\,g\,\frac{H}{\Delta}\,(1+\alpha t-\Delta)},$$

ou, en faisant disparaître le radical,

$$(1+\alpha t)^2 y^2 - 2\,\Delta\,K^2 B^2 g\,H\,(1+\alpha t-\Delta)=0 \qquad (4).$$

De la température qui correspond au maximum de puissance d'un foyer quelconque.

§ 19. Telle est l'équation finale dont nous allons déduire d'abord cette conséquence remarquable que, pour un foyer de grandeur et de nature déterminées, la combustion est arrivée à son maximum de vitesse, quand les gaz brûlés s'échappent à la température moyenne d'environ 300°.

En effet, si l'on différencie par rapport à y et à t, on aura :

$$2y(1+\alpha t)^2\frac{dy}{dt}+2\,\alpha y^2(1+\alpha t)-2\,\Delta\,K^2B^2gH\alpha=0;$$

or, pour que $\frac{dy}{dt}$ soit nul, c'est-à-dire pour qu'on puisse avoir un maximum, il faut nécessairement qu'on satisfasse à la condition

$$y^2(1+\alpha t)-\Delta\,K^2B^2gH=0.$$

Cette équation renferme les deux variables y et t; mais comme on a simultanément l'équation (4), il vient, en éliminant y :

$$2\,\Delta-(1+\alpha t)=0, \text{ ou } t=\frac{2\,\Delta-1}{\alpha}.$$

La deuxième dérivée $\frac{d^2y}{dt^2}$, exprimée en fonction de t seulement, reste négative pour toute valeur positive de t comprise entre 0 et ∞; donc $t=\frac{2\,\Delta-1}{\alpha}$ correspond réellement à un maximum de y, qui sera donné par

$$y=\sqrt{\frac{\Delta K^2B^2gH}{1+\alpha t}}=\frac{KB}{2}\sqrt{2\,g\,H}$$

La relation (2) donne en même temps :

$$\delta = \frac{\Delta}{1 + \alpha t} = \frac{\Delta}{2\Delta} = \frac{1}{2};$$

c'est-à-dire que le foyer atteint son maximum de puissance quand les gaz brûlés s'échappent avec une densité égale à la moitié de celle de l'air extérieur.

Pour avoir une valeur numérique de t, il suffit de faire une hypothèse sur Δ: si l'air sort demi-brûlé, on aura : $\Delta = \frac{26,24}{25,24} = 1,04$, et par suite,

$$t = \frac{2,08 - 1}{0,00375} = 288^o.$$

S'il est complétement brûlé, $\Delta = \frac{13,62}{12,62} = 1,079$, et

$$t = \frac{2,158 - 1}{0,00375} = 308^o,8.$$

Ainsi, on peut conclure en général qu'au delà comme en deçà de 300°, on est dans des circonstances moins favorables pour que l'air froid vienne frapper le combustible avec une grande vitesse.

Loi de l'affaiblissement de cette puissance quand la température varie.

§ 20. Mais conserver une température constante aux gaz brûlés, c'est chose impossible dans un four à chaux : la température y augmente bien au delà de la chaleur rouge, et arrive à 600, peut-être même à 800 degrés. Il est donc d'un haut intérêt de connaître combien le foyer perd alors de sa puissance.

Pour cela, reprenons l'équation (4)

$$(1 + \alpha t)^2 y^2 - 2\,\Delta\, K^2 B^2 g H (1 + \alpha t - \Delta) = 0;$$

appelons P la valeur maximum de y trouvée précédemment, c'est-à-dire posons : $P = \frac{KB}{2}\sqrt{2gH}$; il viendra : $4P^2 = 2K^2B^2gH$, et par suite,

$$(1 + \alpha t)^2 y^2 - 4P^2 \Delta (1 + \alpha t - \Delta) = 0.$$

Cette équation, considérée géométriquement, représente une

courbe symétrique par rapport à l'axe des t, et rencontrant cet axe à une distance de l'origine des coordonnées marquée par

$$1 + \alpha t - \Delta = 0 \text{, ou } t = \frac{\Delta - 1}{\alpha}.$$

Afin de simplifier les calculs, rapportons l'origine des coordonnées à ce point d'intersection, et pour cela posons :

$$x = t - \frac{\Delta - 1}{\alpha};$$

notre équation générale deviendra alors

$$(\alpha x + \Delta)^2 y^2 - 4 \Delta P^2 \alpha x = 0;$$

ou, faisant $\frac{\Delta}{\alpha} = \Delta^1$,

$$(x + \Delta^1)^2 y^2 - 4 \Delta^1 P^2 x = 0;$$

d'où l'on tire enfin :

$$y = \frac{2 P \sqrt{\Delta^1 x}}{x + \Delta^1}.$$

Ainsi donc, connaissant le maximum de la puissance d'un foyer, cette formule donnera immédiatement les variations correspondantes à une valeur quelconque de x; mais afin de généraliser la question, on peut prendre P pour unité, et considérer seulement les valeurs *relatives* de y. C'est de cette manière que nous avons calculé le tableau suivant, en supposant toutefois que l'air reste constamment demi-brûlé; de sorte que $\Delta^1 = \frac{\Delta}{\alpha} = \frac{1,04}{0,00375} = 277,3$, et $y = 33,3 \frac{\sqrt{x}}{x + 277,3}$.

Valeur de x.	50°	100	150	200	250	277	400	500	600	700	800	900	1600
Valeurs relatives de y.	0.72	0,88	0,95	0,986	0,999	1	0,983	0,959	0,93	0,90	0,87	0,85	0,71

Pour faire saisir d'un seul coup d'œil la loi de ces variations, nous avons représenté graphiquement (fig. 1[re]) les valeurs de x et de y; et nous avons fait passer une courbe continue par les extrémités des ordonnées.

On reconnaît alors que la puissance du foyer augmente très-rapidement, à mesure que les gaz brûlés s'échappent à une température moyenne plus voisine de $x = 277°$, ou de $t = 277 + 11 = 288°$; mais qu'au delà de ce terme, elle diminue au contraire très-lentement, et qu'il ne faut pas moins de 700° de température pour que l'affaiblissement soit de $\frac{1}{10}$ du maximum. Telle est donc à peu près la marche qu'on suit dans un four à chaux. Ce qu'il importait en outre de constater, c'est que, par l'effet des hautes températures, la durée de contact d'un poids donné de gaz avec le calcaire augmente plutôt qu'elle ne diminue (§ 13).

Limites de la même puissance quand on fait varier la nature et la grandeur du foyer.

§ 21. La valeur maximum $P = \frac{BK}{2}\sqrt{2gH}$ contient des indéterminées qui varient suivant la nature et la grandeur du foyer; cherchons ce qu'elle devient, et d'abord, si elle est susceptible de quelque limite.

B peut être remplacé par $\frac{1}{4}\varpi D^2 = 0,7854 \times D^2$; $\sqrt{2g}$, par $\sqrt{19,62} = 4,43$; donc déjà

$$P = 1,739 \times K\sqrt{HD^4} \qquad (5).$$

Ensuite, si l'on borne à l'hypothèse de l'air complétement brûlé, les valeurs précédemment indiquées pour K ne seront modifiées que dans leur coefficient numérique, et deviendront :

Pour des parois en terre cuite. $K_1 = 1,982\sqrt{\frac{D}{L+4D}}$;

Idem en tôle.............. $K_2 = 3,126\sqrt{\frac{D}{L+10D}}$;

Idem en fonte............ $K_3 = 4,435\sqrt{\frac{D}{L+20D}}$.

Reportant successivement K_1, K_2 et K_3 à la place de K dans l'équation (5), on aura

$$P_1 = 3,447\sqrt{D^5} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{H}+\frac{4D}{H}}};$$

$$P_2 = 5{,}436\ \sqrt{D^5} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{H} + \frac{10\,D}{H}}};$$

$$P_3 = 7{,}702\ \sqrt{D^5} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{H} + \frac{20\,D}{H}}}.$$

Cela posé, si le canal d'écoulement contient quelques circuits, ou portions inclinées, sa longueur L ne sera pas égale à sa hauteur H; néanmoins l'influence des circuits diminuera à mesure que H augmentera; et enfin quand H deviendra infini, on aura $\frac{L}{H} = 1$, en même temps que $\frac{4\,D}{H}, \frac{10\,D}{H}, \frac{20\,D}{H}, = 0$; de sorte que les radicaux disparaîtront, et qu'il restera :

$$p_1 = 3{,}447\ \sqrt{D^5};$$

$$p_2 = 5{,}436\ \sqrt{D^5};$$

$$p_3 = 7{,}702\ \sqrt{D^5}.$$

Telles sont donc les limites vers lesquelles on converge. Mais, pour mieux fixer les idées, posons $D = 1$; rappelons que P, en général, exprime le poids de gaz qui s'échappe par seconde, et que 1^k de charbon fournit $13^k, 62$ d'air complétement brûlé : nous aurons pour le maximum de combustible consommé dans une heure, par exemple,

Avec des parois en terre cuite.. $\frac{3{,}447}{13{,}62} \times 3600 = 911^k{,}0$;

Idem en tôle................ $\frac{5{,}436}{13{,}62} \times 3600 = 1436{,}7$;

Idem en fonte............... $\frac{7{,}702}{13{,}62} \times 3600 = 2035{,}6$.

Pour passer ensuite de ces nombres à ceux qui conviennent pour tout autre diamètre, il suffira de les multiplier par la racine carrée de la 5[e] puissance de ce diamètre. Il faut remarquer

cependant que la conversion plus ou moins complète de l'oxigène de l'air en acide carbonique a une grande influence sur les limites que nous venons de calculer ; car, en opérant de la même manière dans l'hypothèse de l'air demi-brûlé, on ne trouve que $481^k,6$, 759,9, 1078,0 ; nombres qui diffèrent beaucoup des précédents.

De la loi suivant laquelle on converge vers ces limites.

§ 22. Examinons en dernier lieu si l'on converge rapidement vers ces mêmes valeurs, ou autrement dit, si la grande hauteur des cheminées a réellement toute l'efficacité qu'on lui suppose assez souvent.

Reprenons, pour cela, les formules qui donnent P_1, P_2 et P_3; faisons abstraction des circuits que pourrait présenter le canal d'écoulement, en posant $\frac{L}{H} = 1$; exprimons ensuite la hauteur en fonction de diamètre, c'est-à-dire posons $H = H'D$; il viendra alors évidemment :

$$P_1 = p_1 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4}{H^1}}};$$

$$P_2 = p_2 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{10}{H^1}}};$$

$$P_3 = p_3 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{20}{H^1}}}.$$

Chacune de ces formules se compose de deux parties ; l'une qui ne dépend que du diamètre, et l'autre que de H' : on peut donc regarder la première comme un facteur constant, et s'arrêter à la seconde, qui donnera des valeurs relatives de P_1, P_2 et P_3, quand on fera varier H'. C'est ainsi qu'a été calculé le tableau suivant.

Valeurs de H_1.	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	30	40	50	100
Valeurs relatives de P_1.	0,577	0,707	0,775	0,817	0,844	0,865	0,880	0,897	0,906	0,913	0,936	0,955	0,961	0,982
Valeurs relatives de P_2.	0,410	0,536	0,612	0,667	0,707	0,737	0,763	0,786	0,804	0,817	0,865	0,897	0,913	0,955
Valeurs relatives de P_3.	0,302	0,410	0,480	0,535	0,580	0,611	0,641	0,667	0,688	0,707	0,775	0,817	0,844	0,913

Nous donnons en même temps (fig. 2) la représentation graphique de ces valeurs, afin qu'on suive plus aisément leur loi de variation.

Ainsi donc la nature des parois influe singulièrement sur la hauteur qu'il convient de leur donner. Quand elles sont en terre cuite, c'est-à-dire dans celui des trois cas précédents qui a le plus d'analogie avec les fours à chaux, on voit qu'à 8 diamètres de hauteur, par exemple, on atteint les $\frac{82}{100}$ de l'effet maximum; qu'à 16 diamètres on ne gagne qu'une simple différence de $\frac{1}{10}$; qu'enfin pour doubler cette différence il ne faudrait pas moins de 100 diamètres. Quelle que soit l'influence de la vitesse du tirage sur la combustion, elle ne peut être un motif suffisant pour élever les parois à une aussi grande hauteur; au besoin, il vaudrait mieux y suppléer par l'accroissement du diamètre lui-même, qui se trouve à la puissance $\frac{5}{2}$ dans le facteur constant au moyen duquel on passe des valeurs relatives aux valeurs absolues de P_1, P_2 et P_3 [1].

De la direction de l'axe du four.

§ 23. Jusqu'à présent nous n'avons pas tenu compte des modifications qu'éprouverait le courant de gaz brûlés, si, au lieu d'être sensiblement constante dans toute la hauteur du canal, la température baissait suivant une progression rapide;

[1] Si l'on voulait tenir compte des différences entre L et H, il faudrait, à la rigueur, construire une courbe pour chaque cas particulier; mais les trois

et si ce canal, au lieu d'être cylindrique vertical, était incliné, rétréci supérieurement, ou évasé dans l'intervalle des orifices extrêmes. Tel est le sujet qui va nous occuper; mais n'ayant d'autre application en vue que celle des fours à chaux, nous ne chercherons point à généraliser les conséquences.

Et d'abord, le four ne pouvant avoir qu'une faible hauteur de charge, la direction verticale est la plus convenable pour son axe. En effet, la pression génératrice du tirage dépend de la différence de niveau entre les orifices extrêmes, et non pas de leur distance réelle. Si l'axe était incliné, il en résulterait une diminution de tirage d'autant plus grande que le rapport $\frac{L}{H}$, employé dans les formules précédentes, s'écarterait davantage de l'unité. On y remédierait, sans doute, en construisant une cheminée, comme dans les fours à réverbère, à l'extrémité de la partie inclinée; mais il faut remarquer d'autre part que les tassements, inévitables dans une masse calcaire soumise à la calcination, obstrueraient le passage de la flamme vers la paroi inférieure, et l'agrandiraient au contraire vers la paroi supérieure. De là un chauffage inégal dans une même section perpendiculaire au courant.

Des fours à parois cylindriques.

§ 24. Cela posé, quand le canal d'écoulement est tout à fait libre, les gaz ne perdent d'autre chaleur que celle qui est nécessaire pour échauffer les parois, et, comme ils sont mauvais conducteurs du calorique, ils ne se refroidissent que par

précédentes suffisent déjà pour donner une idée des modifications à introduire, dans l'hypothèse des parois en terre cuite. Elles s'appliquent alors :

La première, comme auparavant, au cas des parois verticales;

La deuxième, au cas où l'excès de L sur H serait égal à 6 fois le diamètre; car alors $L = H + 6D$, et par suite $\sqrt{\frac{L}{H} + \frac{4D}{H}} = \sqrt{1 + \frac{10D}{H}}$;

La troisième, au cas où le même excès serait égal à 16 fois le diamètre; car alors $L = H + 16D$, et $\sqrt{\frac{L}{H} + \frac{4D}{H}} = \sqrt{1 + \frac{20D}{H}}$.

les couches les plus extérieures, de sorte que la température reste à peu près constante, surtout si le canal a un grand diamètre et si les parois sont en maçonnerie compacte. Mais dans un four rempli de pierres calcaires, il n'en est plus de même : les points de contact avec les gaz sont multipliés indéfiniment, et rendent la progression du refroidissement très-rapide. Les parois étant alors cylindriques dans toute leur hauteur, nous allons faire voir qu'il en résulte un superflu toujours croissant de section d'écoulement, superflu nuisible à l'uniformité du chauffage.

En quelque point du four qu'on les considère, les gaz chauds n'en sont pas moins soumis à la pression barométrique ordinaire. Pour faire équilibre à cette pression, il faut qu'ils se contractent à mesure qu'ils se refroidissent, de manière à conserver une élasticité constante. S'ils pouvaient encore s'écouler à pleine section, il faudrait donc que leur vitesse diminuât de plus en plus, depuis la base jusqu'à l'orifice supérieur; or, c'est ce qu'il est impossible d'admettre. En effet, toutes les tranches horizontales et inégalement chaudes dans lesquelles on peut concevoir le courant décomposé sont, pour leur vitesse, subordonnées les unes aux autres. Les plus voisines de la base, c'est-à-dire les plus chaudes, celles qui, prises isolément, jouiraient de la plus grande force ascensionnelle, tendent naturellement à s'échapper dans la direction qui leur oppose le moins de résistance, et par conséquent dans la même que les tranches superposées, quel que soit d'ailleurs l'espace libre environnant; car l'air atmosphérique contenu dans cet espace ne saurait être déplacé et mis en mouvement sans une perte de force vive, perte qui n'aura pas lieu au même degré, à beaucoup près, dans la direction tracée par des tranches de gaz déjà douées d'une certaine force ascensionnelle. L'écoulement étant ainsi limité comme par des parois fixes, la vitesse sera un peu retardée d'un côté, un peu accélérée de l'autre, et deviendra définitivement uniforme dans toute la hauteur du four. Les sections nécessaires pour un même poids

de gaz aux températures t et t', par exemple, seront donc proportionnelles aux volumes correspondants de gaz, et si B représente la base du four, t la température initiale, il ne faudra, pour l'autre température t', que

$$B' = B \times \frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}.$$

L'excédant inutile de section sera alors marqué par

$$B - B' = B \frac{\alpha(t-t')}{1+\alpha t};$$

et on prévoit aisément ce qui arrivera : le courant de gaz se concentrera généralement vers l'axe du four, parce qu'en raison de la forme conique ou hémisphérique de la voûte qui supporte les matériaux calcaires, c'est là que l'intervalle entre les extrémités de la charge est le plus petit. Vers la circonférence, au contraire, l'espace resté libre s'échauffera peu à peu par la conductibilité et le rayonnement latéral; l'air atmosphérique ne pouvant s'y maintenir en équilibre, à cause de sa diminution de densité, s'échappera tangentiellement au courant central et se renouvellera, soit par les fissures des parois, soit par le contour de l'orifice supérieur, ainsi que nous avons essayé de le représenter, fig. 3.

Néanmoins, à mesure que la durée du chauffage augmente, t' approche de t, $B - B'$ de zéro, et on rentre dans le cas des parois cylindriques avec une température à peu près constante; mais il faut remarquer qu'alors la calcination est très-avancée, ou même terminée, dans les parties centrales, et que, pour éviter les incuits d'une part, on s'exposerait d'autre part aux inconvénients de la surcalcination.

Des fours à parois rentrantes.

§ 25. Quelle que soit la hauteur de charge du four, les gaz brûlés, en arrivant à l'orifice supérieur, ne peuvent être refroidis au-dessous de 0°, puisque par hypothèse ce terme exprime la température atmosphérique. Ainsi donc, la section

d'écoulement ne doit être réduite dans aucun cas à moins de

$$b = B \times \frac{1}{1 + \alpha t},$$

ou, si l'on prend 900° pour température initiale de la flamme, $\alpha\, t$ devient $0{,}00375 \times 900 = 3{,}375$, et $b = 0{,}228 \times B$. Il nous serait facile de rapporter des exemples de fours ayant un rétrécissement semblable, sinon même plus considérable; mais voyons seulement ce qui en résulte.

Dès le commencement du chauffage, l'orifice supérieur fait diaphragme par rapport au reste du four, et ne peut plus laisser passer un égal poids de gaz dans l'unité de temps, à moins d'une accélération de vitesse; or, l'expérience démontre que, sous une pression génératrice donnée, la vitesse à l'orifice est indépendante de l'étendue de cet orifice, tant que la vitesse dans le canal même est très-faible; qu'ensuite celle-ci venant à augmenter, la première, il est vrai, varie suivant la grandeur de l'orifice (Péclet), mais dans une progression qui ne suffit pas à beaucoup près pour compenser l'effet du décroissement de section [1]. Ainsi donc, la puissance du foyer diminue, et, le tirage devenant moins actif, la combustion se fait dans des circonstances moins favorables pour l'élévation de

[1] En conservant les mêmes dénominations que dans les paragraphes précédents, et appelant d le diamètre de la section rétrécie, m le coefficient de la contraction des gaz, n un nombre constant pour des parois de nature donnée, on démontre aisément (voir l'ouvrage de M. Péclet) que le rapport de la vitesse réelle à la vitesse théorique est de la forme :

$$K = \frac{n}{m} \sqrt{\frac{\frac{D^5}{d^4}}{L + \frac{n^2\, D^5}{m^2\, d^4}}};$$

tandis qu'on avait auparavant : $K = n \sqrt{\frac{D}{L + n^2 D}}$.

Pour comparer les poids de gaz écoulé dans les deux cas, toutes choses restant égales d'ailleurs, reprenons la formule $y = \frac{K B}{2} \sqrt{g H}$ (§ 19); appelons P^1 et P les valeurs particulières que prendra y, en éliminant K, et

température de la flamme et pour l'effet utile. Remarquons encore que la capacité du four décroît plus rapidement que la surface des parois à échauffer, puisque ces deux quantités considérées dans une même tranche horizontale sont proportionnelles, l'une au carré, et l'autre à la première puissance du diamètre.

Sans doute ces inconvénients ne sont pas très-graves; mais ils font sentir qu'il serait tout au moins inutile de prendre pour l'orifice supérieur une section égale à $0{,}228 \times B$, ou à plus forte raison moindre que cette même quantité, et qu'en se rapprochant davantage du cas des parois cylindriques, on peut avoir encore un chauffage suffisamment uniforme, et augmenter en même temps le tirage et la capacité du four. Le moyen terme à saisir entre ces deux limites ne saurait être fixé *à priori*. Pour le moment, nous nous bornerons à dire qu'il dépend de la hauteur de charge, de l'état de division du calcaire, de sa texture et de sa vitrescibilité.

Des renflements entre les orifices extrêmes.

§ 26. Il ne serait pas moins difficile de calculer la grandeur de toute autre section horizontale du four, ou, autrement dit,

remplaçant B par $\frac{1}{4}\varpi d^2$ dans le premier cas, et par $\frac{1}{4}\varpi D^2$ dans le second, il viendra :

$$P = \frac{n\varpi}{8}\sqrt{2gH}\,.\sqrt{\frac{D^5}{L+n^2 D}}\,;\quad P^1 = \frac{n\varpi}{8}\sqrt{2gH}\times\frac{1}{m}\sqrt{\frac{\frac{D^5}{d^4}\,.\,d^4}{L+\frac{n^2 D^5}{m^2 d^4}}}\,;$$

et par suite :

$$P^1 = P\times\frac{1}{m}\sqrt{\frac{L+n^2 D}{L+\frac{n^2 D^5}{m^2 d^4}}}\,.$$

Si l'on néglige la contraction de la veine fluide, ce qui suppose $m = 1$, et si l'on prend la valeur de n relative aux parois en terre cuite, on aura seulement:

$$P^1 = P\sqrt{\frac{L+4D}{L+4D\left(\frac{D}{d}\right)^4}}$$

; formule où l'on voit que P^1 diminue par rapport à P, à mesure que $\frac{D}{d}$ est plus considérable, c'est-à-dire à mesure que le rétrécissement augmente.

de faire connaître un mode rigoureux pour tracer la courbe de raccordement d'un orifice à l'autre. Néanmoins, on peut donner à ce sujet quelques indications importantes.

Et d'abord, supposons qu'on veuille établir des renflements entre les extrémités de la charge : il arrivera, ou que le renflement se fera sentir par des changements brusques de direction, comme dans les figures 4 et 5, ou qu'il se prolongera par une courbure bien régulière et diminuera en se rapprochant des orifices, comme dans la figure 6. Parcourons ces différentes hypothèses.

Quand des gaz s'écoulent dans un canal libre renflé entre ses extrémités, l'expérience démontre que non-seulement il y a ralentissement de vitesse dans les parties correspondantes au renflement, mais encore qu'il y a augmentation dans le produit de l'écoulement, parce que tout ralentissement de vitesse diminue les frottements et laisse à la pression génératrice du mouvement une plus grande partie de son effet théorique. Dans un four rempli de pierres calcaires, quoique les frottements soient plus considérables, cette circonstance n'est pas de nature à modifier la loi que nous venons d'énoncer. Jusque-là rien ne s'oppose donc à l'adoption des parois à renflement; mais les considérations suivantes nous semblent péremptoires :

1° Les filets fluides arrivant à la seetion inférieure du renflement ne peuvent changer instantanément de vitesse et de direction; il faut un certain temps pour vaincre la force d'inertie. Par la même raison, en arrivant à la section supérieure, ils ne peuvent davantage reprendre instantanément ni leur vitesse ni leur direction primitive. Ainsi donc, le renflement aura d'autant moins d'influence sur les gaz que sa hauteur sera moindre et son diamètre plus grand, et, dans le cas des fig. 4 et 5, le courant, au lieu de suivre le contour *a b c d,* prendra une direction plus intérieure *a b' c d*. Par cela même, le calcaire contenu dans le segment *a b c b'* s'échauffera difficilement.

2° Le même raisonnement n'est plus applicable au four

représenté par la figure 6 ; mais une objection qu'on peut faire également à ce dernier et aux deux précédents, c'est qu'une section *aa'* plus grande que la base *bb'* ne subit que la même durée de feu et ne reçoit que des gaz moins chauds, ce qui est un contre-sens. Aussi, de deux choses l'une, pour compléter la calcination en *aa'*, il faut prolonger outre mesure la combustion, exposer la base *bb'* à un grand excès de température et à une surcalcination inévitable, ou bien, pour conserver ces dernières parties, laisser beaucoup d'incuits dans les premières.

Il est cependant une remarque essentielle à faire en ce moment, c'est de ne pas confondre ce que nous appelons la base de la charge avec la base même du four. La distinction est évidente quand la pierre calcaire est supportée par une voûte en arc de cercle très-surbaissée. Si la voûte est conique ou en ogive, il peut y avoir quelque incertitude; mais on ne s'écartera guère de la vérité en prenant pour base de la charge une section horizontale un peu au-dessous de la clef de la voûte, et considérant les rampants de cette voûte comme une enveloppe du foyer proprement dit. Alors l'intervalle de ces deux sections, le rapport de leurs grandeurs et la manière de les raccorder, se rattachent à l'examen de la construction même du foyer.

Du tracé des parois.

§ 27. Ayant admis en principe que les parois du four doivent être rentrantes depuis la base jusqu'à l'extrémité supérieure de la charge, on peut prendre pour raccorder les diamètres dans un même plan vertical, soit une ligne droite, soit un arc de cercle ayant son centre sur le diamètre ou en dessous du diamètre de la base, soit enfin une courbe en partie concave vers l'axe et en partie convexe. Il s'agit de déterminer le système le plus convenable.

En général, le foyer est concentrique avec les parois du four; raisonnant donc dans cette hypothèse, les filets fluides

qui s'élèvent des divers points de la base bb' (fig. 7) tendent à s'écouler dans la direction de la pression génératrice du mouvement, c'est-à-dire verticalement; mais à cause du refroidissement qu'ils éprouvent par le contact de la pierre calcaire, ils se contractent et se rapprochent de l'axe. Donc, quelle que soit la courbe décrite alors par les filets extrêmes en b et b', comme le changement de direction n'est jamais instantané, cette courbe aura un élément commun avec les verticales $b\ a$, $b'\ a'$, ou perpendiculaire à bb'. D'autre part, à l'orifice oo', si les gaz s'échappent immédiatement dans l'atmosphère, c'est-à-dire dans un milieu complétement libre, ils n'auront plus besoin que d'une section d'écoulement beaucoup moindre; ils tendront à se contracter très-rapidement vers l'axe, et par conséquent les filets extrêmes, en o et o', suivront certaines directions inclinées $o\ c$, $o'\ c'$. Donc, il convient que le dernier élément de la courbe des parois soit tangent à ces mêmes directions. On voit en résumé que la courbe de raccordement des points b et o, par exemple, doit être perpendiculaire à la base bb', et couper sous une direction inclinée l'orifice oo'; conditions qui peuvent être remplies en faisant passer un arc de cercle par les points b et o, et prenant son centre sur le prolongement de bb'. On opérerait de même pour raccorder les points b' et o'.

Si, au contraire, en s'élevant au-dessus de l'orifice, les gaz repassaient presque aussitôt dans un autre milieu de même nature, comme serait, par exemple, un deuxième four concentrique avec le premier; alors, dans l'intervalle de ces deux fours, le courant ne pourrait pas varier sensiblement de forme, et les filets fluides extrêmes en o et o' s'écarteraient peu de la direction verticale; par conséquent le dernier élément de la courbe devrait aussi être vertical. Pour satisfaire à cette nouvelle condition, il suffirait d'imaginer au-dessous de oo' un col droit $o\ m\ m'\ o'$ (fig. 8), de raccorder les points m et m' avec ceux de la base b et b', comme dans la figure 7, puis de faire disparaître les jarrets en m et m' par des arcs de cercle $c\ o$, $c'\ o'$ ayant leur centre sur le prolongement de $o\ o'$.

Quant au contour d'une section horizontale quelconque, la forme circulaire est évidemment la plus convenable; car c'est elle qui renferme la plus grande surface dans les moindres limites, et qui par conséquent perd le moins de chaleur pour une contenance donnée. C'est elle en outre qui présente le plus de résistance à la poussée du dehors au dedans, et peut-être même le plus de chances pour l'égale répartition de la chaleur, du moins dans les parties voisines du foyer et exposées au rayonnement.

Du chauffage dans le sens de la hauteur du four.

§ 28. Passons maintenant à l'examen d'une nouvelle question, celle du chauffage dans le sens de la hauteur du four.

En se rappelant les lois de transmission de la chaleur entre les gaz et les corps solides, lois résumées par la formule du § 3, on voit que la flamme doit se refroidir rapidement à mesure qu'elle s'élève, et céder des quantités inégales de chaleur dans des espaces parcourus égaux; d'où résulte que la vitesse du chauffage diminue en raison de la distance au foyer. Sous une chaudière à vapeur, par exemple, la flamme et la surface de chauffe en un point quelconque restent constamment aux mêmes températures respectives, parce qu'on dépense en vapeur d'un côté tout le calorique qu'on reçoit de l'autre. Alors il est possible de calculer le décroissement de température pour une distance donnée. Au contraire, dans un four, non-seulement la température de la masse augmente de plus en plus, mais encore la transmission du calorique de la surface vers le centre des fragments calcaires dépend de la conductibilité, et par suite du volume et de la texture de ces mêmes fragments. Nous tenterions vainement de résoudre un problème aussi compliqué; toutefois nous pouvons, par des considérations générales, arriver à quelques conséquences importantes dont voici d'abord l'énoncé : l'effet utile du combustible augmente en même temps que la hauteur de charge; mais la vitrescibilité du calcaire ne permettant pas de dépasser certaines limites, il

faut profiter des inégalités de volume des pierres calcaires pour compenser les inégalités de chauffage, rafraîchir la flamme dans le foyer même par l'emploi de la vapeur d'eau, et enfin diviser le four en deux ou plusieurs compartiments, munis chacun d'un foyer.

Influence de la hauteur de charge.

§ 29. Nous avons expliqué comment il importe, pour l'effet utile des combustibles, d'obtenir simultanément un tirage actif et un grand refroidissement de la flamme, pourvu d'ailleurs que ce refroidissement ne soit pas tellement prompt qu'il empêche l'inflammation complète des gaz de la distillation. Il s'agit de faire voir jusqu'à quel point la hauteur de charge, dans un four à chaux, peut rendre ces conditions compatibles.

Le refroidissement de la flamme dépend de la durée de son contact avec la pierre calcaire; cette durée de contact s'obtient, ou en diminuant la vitesse d'écoulement des gaz sans changer la hauteur de charge, ou en augmentant la hauteur de charge sans changer sensiblement la vitesse. Le premier moyen n'est pas admissible; car il exigerait, ou qu'on adoptât le système des fours à renflements entre les orifices, ou qu'on s'exposât à une mauvaise combustion par défaut de tirage. Quant au second moyen, si l'on se reporte aux courbes du tirage (fig. 2, § 22), si l'on fait attention à la manière dont ces courbes changent suivant la nature des parois, ou même, si l'on se borne pour les fours à chaux à la courbe qui concerne les parois en terre cuite, il devient manifeste que, dès le moment où l'on atteint en hauteur au-dessus du combustible seulement quatre fois le diamètre d'un canal équivalent à la somme des vides, la vitesse du tirage n'augmente déjà plus que dans une progression très-faible pour des accroissements considérables de hauteur, et qu'ainsi l'effet utile d'un poids donné de gaz chauds s'améliore très-rapidement.

D'après cela, étant maître d'augmenter le refroidissement de la flamme, ce refroidissement peut-il aller jusqu'à nuire au

tirage? C'est un doute qu'il est facile de dissiper, du moins sous le rapport purement théorique. En effet, la pierre s'échauffe assez promptement à la surface, à cause de son peu de conductibilité et de chaleur spécifique; les gaz aussi sont peu conducteurs; et, comme on le sait par les lois du refroidissement, ils émettent une proportion de chaleur d'autant plus faible que leur température est moins élevée; or, dès le moment où ils sortent à 100°, on voit par la courbe du § 20 que le tirage est déjà plus des $\frac{4}{5}$ du maximum, et presque égal à celui qui correspond à 700°. Ainsi donc s'il suffit dans ce dernier cas, il doit suffire aussi dans le premier.

Enfin, par cela même que les surfaces voisines du foyer rougissent promptement, elles laissent aux gaz de la distillation la facilité de s'enflammer complétement.

Jusque-là rien ne s'oppose à l'adoption du moyen précédent, celui d'une grande hauteur de charge, pour améliorer l'effet utile du combustible. Mais faisons remarquer, d'autre part, que les inégalités de température entre la base et l'orifice supérieur du four ne diminuent qu'à mesure qu'on approche de la température même de la flamme; qu'alors les calcaires ocreux ou argileux sont vitrifiables; et que par suite, dès que la base arrive au terme de surcalcination, il faut retrancher, comme excédant au moins inutile, toute la hauteur où la calcination n'est pas encore terminée. On peut donc poser en principe que moins la température finale doit être élevée, moins il faut de hauteur de charge; qu'il en faut d'autant moins que les corps à échauffer sont plus fusibles, moins pour une argile ocreuse que pour un calcaire mélangé, moins pour celui-ci que pour un calcaire pur. On sent ainsi combien il serait important d'avoir des moyens d'obvier à l'inégale répartition de la chaleur dans le sens vertical.

De la division du four en compartiments munis de foyers.

§ 30. Le premier qui s'offre à l'esprit consiste à faire un triage de la pierre calcaire telle qu'elle sort de la carrière, à

rassembler les plus gros fragments vers la partie basse de la charge, et les plus petits vers la partie supérieure (§ 2). Néanmoins l'avantage qui en résulte est assez borné; car il faut éviter, d'une part, les blocs trop volumineux; par exemple ceux qui excèdent 0^{m},20 d'épaisseur, parce que leur surface serait surcalcinée avant que le centre eût atteint le degré convenable de chaleur; et, d'autre part, les fragments trop menus, parce que leur cassage exige une main-d'œuvre très-dispendieuse.

Un second moyen consiste à modérer la grande chaleur qui se manifeste jusqu'à une certaine distance du foyer, en introduisant de la vapeur d'eau; et ce moyen devient admissible si l'on constate que l'action chimique développée sur le carbonate de chaux compense ce qu'un abaissement de température fait perdre en effet utile.

Mais ce qu'il y a de préférable, c'est d'employer un système de four à compartiments; c'est-à-dire d'établir d'abord un premier four avec une hauteur de charge ordinaire; puis un second sur le prolongement des mêmes parois, muni également d'un foyer; de telle sorte que le feu devant cesser d'une part, on puisse le continuer de l'autre, et achever ainsi la calcination.

De là à utiliser encore la chaleur que conserve le premier four, et qu'on laisse généralement se dissiper en pure perte, il n'y a qu'un pas; il suffit que le second foyer soit disposé de manière à tirer de l'air atmosphérique par l'ouverture du foyer inférieur. Cet air s'échauffe fortement avant d'arriver au combustible; il donne à la flamme un accroissement considérable de température et accélère la calcination. Mais, par cela même, la hauteur de charge ne doit pas être égale dans les deux fours [1].

[1] L'idée des fours à compartiments superposés paraît être due à un faïencier d'Apt (Bulletin de la Société d'encouragement, 7e volume). Le peu de renseignements que nous avons trouvés à ce sujet nous apprennent que chaque compartiment avait un foyer extérieur où l'on introduisait di-

Enfin, il serait possible d'élever un troisième, peut-être même un quatrième four concentrique avec les deux premiers, et suivant le même mode de rétrécissement dans les dimensions transversales; mais il faut remarquer que la diminution de capacité de ces fours, et la nécessité d'élever les matériaux à une grande hauteur, finissent par rendre l'avantage peu sensible. L'expérience d'ailleurs, ainsi que nous aurons occasion de l'expliquer, fait reconnaître qu'il est certaine limite qu'on ne saurait dépasser.

Formes diverses de fours soumis à des expériences comparatives.

§ 31. Il nous reste à résoudre plusieurs questions qui, par leur complication ou par leur nature même, échappent aux moyens analytiques, et d'autres enfin qui ne sont que la recherche du meilleur mode d'application des principes précédemment développés. Nous avons dû pour cela faire des expériences comparatives sur diverses formes de fours, dont nous allons donner succinctement la description, et discuter les résultats généraux, en renvoyant tous les détails numériques aux chapitres suivants.

Le four n° 1 (fig. 9 et 10) est un ancien four à poterie qui existait à l'époque où fut autorisée la création d'une chaufournerie dans le port de Brest (décision ministérielle du 18 novembre 1823.) Il est à foyer intérieur, sans grille; le bois brûle debout; la même ouverture latérale sert à l'introduction de l'air et du combustible; la section horizontale est circulaire; les parois sont rentrantes, concaves vers la base, convexes vers l'orifice, et formées par le raccordement de trois arcs de cercle ainsi disposés :

1er Arc, concave, rayon de 5^m58; centre à 1^m45 au-dessus du sol;
2e Arc, *idem*, rayon de 4^m00; centre à la même hauteur;

rectement de l'air froid, et que les parois intérieures formaient un cylindre vertical. Une pareille disposition admissible pour la brique, où l'inégalité de cuisson n'est pas un mal grave, ne pourrait, comme on le sent aisément, convenir pour la pierre calcaire.

3[e] Arc, convexe, rayon de 6m72; centre sur le prolongement du rayon extrême du 2[e] arc, et à 5m72 du sol.

La hauteur totale du four est de 6m,40; le diamètre à la base est de 3m,15 ; au niveau du plus grand évasement, ou des centres des deux premiers arcs, 3m,55; et à l'orifice supérieur 1m,72. La voûte qui supporte la charge se fait en pierres calcaires, en forme d'ogive de 0m,40 d'épaisseur de pied-droit, et 2 mètres à 2m,50 de hauteur sous clef; elle est évidée vers l'entrée du foyer par la pénétration d'une autre voûte en berceau incliné. La contenance moyenne est de 26 mètres cubes; l'épaisseur des parois est de 2 mètres; et enfin la maçonnerie est en moellon de gneiss, avec mortier d'argile vers la paroi intérieure seulement, et mortier ordinaire pour le reste.

Le four n° 2 (fig. 11), construit en 1825 par M. Le Beurriée, qui était alors conducteur principal des travaux maritimes, a beaucoup de dispositions et dimensions communes avec le précédent. Il a même espèce de foyer, même diamètre à l'orifice supérieur, à peu près même évasement, 3m,66, et même hauteur totale, 6m,40. Il n'en diffère essentiellement que par la courbure des parois, formée de deux arcs concaves vers l'axe, ayant leurs centres à la même distance du sol, 2m,10, et donnant pour longueurs de rayons, le premier 13m,44, et le second 8m,10. La contenance moyenne en pierres calcaires est alors considérablement augmentée; elle est de 42 mètres cubes.

Le four n° 3 (fig. 12), construit vers la même époque que le n° 2, ne diffère du système recommandé par MM. Donop et Deblinne (*Bulletin de la Société d'encouragement, 1810*), qu'en ce que la voûte en pierres calcaires est remplacée par une voûte fixe à claire voie, et qu'on a établi une porte de décharge latérale, indépendante du foyer. Quant à ce foyer, il est muni d'une grille de 1m,40 de diamètre, d'une ouverture de 0m,40 en carré pour l'introduction du combustible, d'une autre égale pour le cendrier et le passage de l'air froid. La distance du fond du cendrier à la grille est de 0m,70, de la

grille à la clef de la voûte $0^m,85$, de l'extrados de cette voûte au col droit $3^m,00$, de la base du col droit à l'orifice $0^m,65$. Le diamètre à la naissance de la voûte est de $1^m,70$, à l'orifice de $0^m,70$. Les parois sont formées par un seul arc de cercle de $4^m,10$ de rayon, et ayant son centre à $0^{mc},75$ au-dessus de l'extrados de la voûte. L'épaisseur de ces parois est de $1^m,50$, et enfin la contenance en pierres calcaires de $9^m,00$.

Le four n° 4 (fig. 13), également construit par M. Le Beurriée, au commencement de 1826, suivant le système de M. Bonnet d'Apt (page 44), est à trois compartiments superposés, et séparés par des voûtes fixes à claire voie. Les deux premiers ont chacun un foyer à grille dans une position excentrique au vide du four, et une hauteur de $2^m,70$ entre l'extrados d'une voûte et la naissance de l'autre. Le troisième, de $1^m,75$ de hauteur, est destiné seulement à servir de séchoir. Leur ensemble forme un cylindre droit de $2^m,27$ de diamètre, terminé en dôme, et laissant pour la fumée un passage de $0^m,70$ de diamètre.

Observations sur les espèces de foyers employés.

§ 32. Tels sont les fours qui existaient à Brest, à l'époque où nous avons été chargé du service de la chaufournerie, et sur lesquels nous devions porter notre attention. Les trois premiers étaient pour la calcination de la pierre calcaire, et le quatrième pour la cuisson de la brique. Mais, quoique la brique exige moins de chaleur que la chaux, elle présente une particularité importante : c'est que, si l'on se sert d'argile ocreuse, son apparence extérieure et sa cassure varient suivant l'intensité du feu; qu'ensuite le déchargement, qui s'opère avec beaucoup plus de précautions que pour la chaux, permet de constater dans le four même le mode de répartition de la chaleur. Développons maintenant les conséquences auxquelles nous avons été conduit.

Dans les fours n°s 1 et 2, le combustible s'appuie contre les pieds-droits de la voûte en pierre calcaire. Cette dispo-

sition semble très-favorable pour répartir à volonté le courant de flamme dans les diverses parties de la charge; mais, 1° comme rien ne force l'air à se disséminer en entrant, ce n'est que dans l'espace vide du foyer que s'opère complétement son mélange avec les gaz carbonés; 2° la vitesse même avec laquelle cet air afflue détermine un courant principal à l'arrière du four, par suite une surcalcination dangereuse, et même une détérioration assez prompte de la maçonnerie des parois; 3° les débris charbonnés de bûches ou de fagots tombent constamment, et s'accumulent dans le foyer avec la cendre, y forment une masse difficile à consumer, encombrante et nuisible par sa grande chaleur rayonnante sur les fragments calcaires les plus rapprochés; 4° enfin, l'ouverture latérale laisse passer beaucoup de calorique; et c'est pour y remédier en partie qu'on a coutume de réduire cette ouverture au moyen d'une dalle, ou pierre plate d'environ $0^{m},60$ de hauteur, dressée contre la barre de fer sur laquelle les chaufourniers appuient leur fourche ou leur rable.

Dans le four n° 3, l'air arrivant par en dessous est bien divisé par le double obstacle que présentent à son passage les barreaux de la grille et le combustible qui la recouvre; la flamme ne tourbillonne pas comme dans les n°s 1 et 2, elle s'élève directement; la distance $0^{m},85$, entre la grille et la clef de la voûte, paraît bien suffisante pour ne pas refroidir trop promptement les gaz; et on n'a plus à redouter l'excès de chauffage vers l'arrière du four, ou du moins il est à peine sensible. Le vide entre les barreaux étant convenablement réglé, le brasier reste sur la grille, et s'y consume avec rapidité par le contact de l'air affluent. Enfin, la porte qui est au-dessus du niveau de la grille, ne devant être ouverte que dans les instants où l'on renouvelle le combustible, s'oppose efficacement à la déperdition de calorique par rayonnement.

Dans le four n° 4, la flamme suit une direction inclinée, pour passer du foyer à la base de la charge; durant ce trajet, elle ne se refroidit que pour échauffer les parois qui la con-

tiennent; et celles-ci, une fois portées à l'incandescence, contribuent à rendre le foyer fumivore. Mais, pour les fours à chaux ou à briques, cette disposition n'est d'aucun avantage; car les foyers à flamme droite peuvent aussi devenir fumivores, quand les couches de calcaire ou de briques les plus voisines arrivent à la chaleur rouge; elle a même un inconvénient grave : c'est que la flamme, cherchant à s'élever par le plus court chemin, échauffe beaucoup plus la partie antérieure que le reste du four. On l'éviterait sans doute, si l'on avait plusieurs foyers semblables autour de la base; mais à quoi bon multiplier les pertes de chaleur et compliquer la surveillance?

Conséquences relatives à la détermination de la hauteur de charge.

§ 33. L'inégalité de répartition du courant de flamme n'est pas assez considérable dans les trois premiers fours, pour influer sensiblement sur la hauteur de charge qu'il convient d'adopter. Quant au quatrième, il eût été difficile d'en tirer quelque conclusion exacte; les résultats de la cuisson étant tout à fait médiocres, nous avons dû d'abord modifier le foyer suivant le système du four n° 3, et supprimer momentanément les compartiments supérieurs, afin d'augmenter à volonté la contenance du premier.

Cela posé, dans les fours n°s 1 et 2 la distance de la voûte à l'orifice supérieur est d'environ 4 mètres; or, il arrive que, malgré la précaution de réunir tous les petits fragments calcaires vers l'orifice, on ne peut obtenir dans cette partie une bonne calcination, sans rendre noire et paresseuse à l'extinction, la chaux qui forme la voûte et celle qui l'avoisine. On doit donc regarder une pareille hauteur de charge comme trop grande pour le calcaire de Brest. Le four n° 3 lui-même n'est pas complétement à l'abri de la surcalcination : néanmoins la chaux fuse avec facilité, sans déchet appréciable; et par suite la hauteur de 3 mètres n'a rien d'exagéré.

Enfin, le four n° 4 modifié comme il a été dit plus haut,

et employé pour la cuisson de la brique ocreuse, conduit à une observation intéressante; c'est que, pour éviter les mauvais effets de cuisson dus à la forme cylindrique des parois, si l'on élève la charge en tronc de cône, sans s'inquiéter du vide laissé entre elle et les parois; et si, au lieu de $2^m,70$, on lui donne jusqu'à 5 mètres de hauteur; qu'alors on modère le feu, de manière à porter la durée de l'opération de quarante à soixante-six heures, on obtient une cuisson qui laisse encore à désirer, il est vrai, mais qui, en définitive, est passable, et bien supérieure à celle des premières fournées. De là résulte que la hauteur de charge peut paraître trop faible ou trop forte, suivant la manière dont la combustion est dirigée; mais nous verrons plus tard que l'avantage qu'on retirerait de ce fait n'existe plus, quand on vient à estimer les dépenses en combustible.

Conséquences relatives à la détermination du diamètre moyen, ou de la capacité du four.

§ 34. L'une des dimensions principales à déterminer, c'est le diamètre du four à la base de la charge, ou, autrement dit, le plus grand diamètre. Mais, ainsi qu'on le remarque dans les fours n°s 1 et 2, les diamètres à la base et à l'orifice supérieur peuvent être les mêmes, et les fours très-différents, à cause de la courbure des parois. Il vaut donc mieux changer la position de la question, et examiner l'influence de la capacité du four, c'est-à-dire du produit de la hauteur par la section moyenne; alors si la hauteur est un terme commun dans les fours que l'on compare, on en déduit l'influence de la section moyenne.

Faisons remarquer, en premier lieu, que les parois du four s'échauffent aux dépens de la masse calcaire; mais comme elles sont compactes, la chaleur ne s'y transmet que latéralement, et par un rayonnement de molécule à molécule. On conçoit donc que, la substance même des parois étant peu conductrice, les températures diminuent très-rapidement

en raison des distances. Néanmoins, cet effet dépend beaucoup de la durée d'application de la chaleur : pendant les premiers jours, et avec des parois épaisses, les surfaces extérieures ne varient pas sensiblement de température; au delà de ce terme, elles s'échauffent peu à peu, elles tendent à se mettre en équilibre avec les parties centrales, et ne demeurent stationnaires que quand elles émettent d'un côté tout ce qu'elles reçoivent de l'autre. Cela posé, quelque faible que soit la proportion de chaleur absorbée par les parois, il n'en résulte pas moins que les grands fours sont avantageux pour l'économie en combustible; car la hauteur étant constante, la capacité croît comme le carré des diamètres ou la première puissance de la section moyenne, et la surface intérieure des parois, comme la première puissance des diamètres ou la racine carrée de la section moyenne.

Cependant les quantités de chaleur perdue ne sont pas, pour deux fours inégaux, dans le rapport exact des surfaces de parois, parce que la durée nécessaire pour la calcination augmente avec la capacité. Ainsi, par exemple, le four n° 1, dans lequel on calcine 26 mètres cubes de pierres, exige, temps moyen, quatre-vingt-treize heures de feu; tandis que le four n° 2, de la contenance de 42 mètres cubes, exige environ cent dix-sept heures. Cette circonstance diminue un peu l'avantage que nous venons de signaler; aussi la dépense en combustible, par mètre cube de pierres calcaires, étant de 1,087 kilogrammes moyennement pour le premier four, est encore de 1,039 kilogrammes pour le second. Mais en comparant des fours de capacité beaucoup moindre, il n'en serait plus de même. Par exemple, le four n° 3, chargé avec des matériaux de même nature et de même volume que les précédents, consomme près de 1,900 kilogrammes par mètre cube; or, à coup sûr, une différence aussi grande ne saurait être attribuée uniquement à la différence de hauteur de charge; car, en supposant l'économie de combustible directement proportionnelle à cette hauteur, ce qui est certainement exagéré, on aurait

encore, en passant de 3 mètres à 4 mètres, $\frac{3}{4}$ 1,900^k = 1,423^k.

En résumé, nous pouvons conclure que, dans les fours à chaux, toute contenance supérieure à 26 mètres cubes, quand la hauteur de charge est d'environ 4 mètres, ou plus généralement, que toute section moyenne plus grande que 6 mètres carrés n'influe pas sensiblement sur l'économie en combustible; mais qu'en dessous de ce terme la dépense augmente de plus en plus.

Premier système de four modifié.

§ 35. Nous allons exposer maintenant les modifications successives que nous avons faites pour arriver à un système de four plus économique, et conforme aux principes déjà développés. La première est représentée par les fig. 14 et 15, et forme le four que nous appellerons n° 5. Ce four est à parois rentrantes, à deux compartiments superposés, et à foyers intérieurs avec grille. Il ne nous a servi que pour la cuisson de la brique; c'est pourquoi chaque compartiment est muni d'une voûte fixe à claire voie, destinée à supporter la charge. Voici ses principales dimensions :

Compartiment inférieur, grand diamètre, 2^m,60; orifice 1^m,40; hauteur de charge 2^m,70;
Compartiment supérieur, grand diamètre, 2^m,00; orifice 0^m,80; hauteur de charge 2^m,30;
Partie libre au-dessus de ce dernier compartiment, 0^m,70 de hauteur;
Distance entre la grille et la clef de chaque voûte, 0^m,80 au 1er compartiment et 0^m,70 au 2e;
Hauteur de cendriers, 0^m,70 au 1er compartiment et 0^m,60 au 2e.

Les ouvertures latérales ont généralement 0^m,40 en carré. Dans le premier compartiment, celle du foyer est séparée du cendrier par une cloison en maçonnerie; mais, dans le second, c'est par une ou plusieurs plaques en fonte, mobiles dans des rainures. On les enlève au moment de charger et de décharger, et on obtient ainsi une communication facile avec l'intérieur

du four. Pendant toute la durée de la cuisson, l'ouverture du cendrier supérieur est condamnée par une cloison en briques; car une seule prise d'air froid suffit pour les deux grilles. Pendant la même durée, les portes de décharge, que nécessite l'emploi des voûtes fixes, sont également condamnées par deux cloisons, l'une du côté de la paroi intérieure, l'autre vers la paroi extérieure. Ajoutons enfin que la section horizontale (fig. 15) est composée par quatre arcs de cercle égaux, ayant chacun leur centre sur le milieu de l'arc opposé.

Ce système ne donne pas une section moyenne égale à la limite calculée précédemment (§ 34); néanmoins il réussit bien pour la brique, qui exige une durée de feu beaucoup moindre que la pierre calcaire, et qui permet par conséquent de s'en tenir sans inconvénient à des capacités plus petites. Il nous a prouvé que, la cuisson étant terminée dans le premier compartiment, il suffit de quelques heures de feu pour la compléter dans le deuxième; de plus, que la seconde grille se détériore bien plus vite que l'autre, sans que toutefois cette circonstance entraîne à des renouvellements trop fréquents.

Les hauteurs de charge, $2^{m},70$ et $2^{m},30$, sont peu considérables; et cependant elles ne paraissent pas susceptibles d'augmentation bien sensible, quand on ne doit cuire que de la brique. Le rapport de l'orifice à la base du premier compartiment est égal à $\left(\frac{1^{m},40}{2^{m},60}\right)^2 = 0,29$, nombre qui ne s'éloigne guère de la limite inférieure 0,228 (§ 25); la base du deuxième compartiment, qui a $2^{m},00$ de diamètre, excède de beaucoup l'orifice du premier, qui n'a que $1^{m},40$, et établit par conséquent un renflement de section proportionnel au carré du rapport de ces diamètres, etc. On conçoit donc que ce four n° 5, malgré les avantages qu'il nous a procurés, est encore susceptible de modifications importantes, s'il s'agit de l'appliquer à la calcination de la pierre calcaire. Tel est le but que nous nous sommes proposé en construisant le four n° 6, dont nous allons maintenant donner la description.

Second système de four modifié.

§ 36. Ce four est représenté par la fig. 16; il est à capacité beaucoup plus grande que le précédent; à section horizontale circulaire; à cuvette, pour faire évaporer de l'eau dans le cendrier inférieur; sans voûte fixe, mais à encorbellements, pour donner des points d'appui à la pierre calcaire. Voici d'ailleurs le détail de ses dimensions.

Compartiment inférieur.

La grille, surface $= 3^{mq}$; diamètre $= 1^m,95$;
Le plus grand évasement, surface $= 3^{mq} \times 3,33 = 9^{mq},99$; diamètre $1,82 \times 1^m,95 = 3^m,55$;
L'orifice ou l'extrémité de la charge, surface $= 9^{mq} \times 0,40 = 3^{mq},99$; diamètre $0,63 \times 3^m,55 = 2^m,24$;
L'entrée du foyer, $0^m,40$ sur $0^m,40$ en section;
Idem du cendrier, $0^m,50$ sur $0^m,50$;
La hauteur du cendrier sous la grille, $0^m,50$;
La distance entre la grille et le plus grand évasement, $1^m,30$;
La hauteur de charge au-dessus de cet évasement, $3^m,00$;
La capacité de ce compartiment, déduction faite du vide qui est au-dessus de la grille, $26^{mc},5$.

Compartiment supérieur :

Le plus grand évasement, son diamètre surpasse de $\frac{1}{10}$ celui de l'orifice du compartiment inférieur, ce qui donne, ci. . . surface $= 3^{mq},99 \times \left(\frac{11}{10}\right)^2 = 4^{mq},83$; diamètre $= \frac{11}{10} \times 2^m,24 = 2^m,46$;
L'extrémité de la charge, surface $= 4^{mq},83 \times 0,40 = 1^{mq},93$; diamètre $2^m,46 \times 0,63 = 1^m,55$;
La grille, surface $\frac{4,83}{3,33} = 1^{mq},45$; diamètre $\frac{2,46}{1,82} = 1^m,35$;
L'espace libre au-dessous de la grille, hauteur $= 0^m,50$;
La distance entre la grille et le plus grand évasement, $1^m,20$;
La hauteur de charge, $2^m,50$;
L'espace libre au-dessus de la charge, hauteur $= 0^m,50$; diamètre supérieur $= 1^m,00$;
La capacité mesurée comme dans le compartiment inférieur, $10^{mc},50$;
L'épaisseur des parois, prise perpendiculairement à la surface d'un cône qui serait tangent aux deux compartiments à la fois, $= 2^m,00$.

Cette épaisseur paraîtra sans doute exagérée, et susceptible d'être réduite sans inconvénient pour la solidité; car on sait, par exemple, que les fours dits de *campagne* n'ont pour tout revêtement qu'une couche de terre végétale de $0^m,50$ à $0^m,60$ d'épaisseur, maintenue extérieurement par un simple clayonnage; mais alors la charge repose totalement sur le sol. Nous ferons remarquer en outre que le compartiment inférieur du four n° 6 a été construit en reprise dans le massif de l'ancien four n° 1. Quant au deuxième compartiment, on a fait seulement les enveloppes intérieure et extérieure en maçonnerie de $0^m,50$ d'épaisseur, et on a damé de la terre végétale entre deux: cela n'a pas empêché que les parois fussent lézardées de part en part, dès la première fournée. Un autre four à compartiments, construit dans les environs de Brest, par l'un de nos amis, avec cette double enveloppe, et un remplissage en terre végétale, mais isolé de toute espèce de coteau ou terre-plein, s'ouvrait tellement qu'on fut obligé de le consolider par plusieurs contre-forts. En définitive, il est donc préférable de pécher plutôt par excès que par défaut de maçonnerie.

Diverses dispositions de ce four n° 6 ont également besoin d'être motivées; et, comme les changements ultérieurs que nous avons faits ne portent pas sur elles, nous allons de suite entrer dans les détails nécessaires.

De la grille.

§ 37. L'expérience indique comme une proportion convenable pour bien diviser l'air froid, retenir tout le charbon, et ne laisser tomber que la cendre, un intervalle de $0^m,01$ entre les barreaux, et une épaisseur de $0^m,03$ environ; de sorte que le vide est $\frac{1}{3}$ du plein, ou $\frac{1}{4}$ de la surface totale. Ensuite, chaque barreau a pour section transversale un triangle allongé en forme de coin; il repose par ses extrémités sur l'arête correspondante à l'angle le plus aigu; et pour cela on lui donne de la stabilité au moyen de deux crossettes tournées

en sens contraire, et ayant de saillie précisément ce qu'il faut pour régler la distance d'un barreau à l'autre. Cette disposition est préférable à celle des barreaux carrés posant sur leur diagonale; parce que, dans ce dernier cas, les vides s'agrandissent rapidement, pour peu que le fer soit oxidé par l'action du feu. Enfin, toutes les fois qu'ils ne doivent pas être exposés à une forte incandescence, le fer fondu peut remplacer avec avantage le fer forgé; il est moins oxidable et moins dispendieux.

Les fig. 17, 18 et 19 représentent en plan, élévation et coupe, à l'échelle de $\frac{1}{2}$ centimètre pour mètre, l'un des barreaux du four n° 6. Trois semblables mis bout à bout forment le diamètre de la grille inférieure. Toutefois, on doit laisser à chacun un jeu d'environ $0^{m},01$, afin d'éviter les déformations qui résulteraient de l'allongement par la chaleur (dans les fonderies, on compte ordinairement que le retrait des objets moulés est d'une ligne par pied, ou $0^{m},007$ par mètre).

Au premier aperçu, on pourrait croire qu'il suffit de changer le rapport du vide au plein, de l'augmenter, par exemple, pour que sur une surface donnée de grille la quantité de bois brûlé augmentât proportionnellement : mais les principes développés au commencement de ce chapitre démontrent que la puissance du foyer est subordonnée particulièrement à la forme du canal d'écoulement et à la température des gaz sortants. Dès lors, il suffit que la grille laisse assez de vide pour ne pas forcer l'air affluent de prendre à travers les barreaux une vitesse beaucoup plus grande que dans le four même, comme cela a lieu par l'interposition d'un diaphragme dans tout canal rempli d'un fluide en mouvement; car cette accélération de vitesse ne compense pas l'effet de la réduction de section, et nuit par conséquent à la puissance du foyer. On doit ajouter encore que plus la grille GG' (fig. 20) serait petite par rapport à la base de la charge BB', plus l'uniformité de chauffage serait difficile; car les gaz chauds ne pouvant perdre que peu à peu leur excès

de vitesse, formeraient un courant principal vers l'axe. Au contraire, une grille gg' où la vitesse serait plus faible qu'en BB' serait sans aucun avantage, et même gênerait pour l'établissement des pieds-droits et le surbaissement de la voûte en pierres calcaires.

Cela posé, voici comment nous avons déterminé, dans le four n° 6, le rapport entre ces deux grandeurs. L'air pur s'échauffe déjà en traversant la grille; néanmoins, comme avec un bon tirage et un foyer bien construit on peut utiliser les $\frac{2}{3}$ de l'oxigène, et même au delà, il n'y a rien d'exagéré à supposer que cet air subit encore au-dessus de la grille un accroissement de température de 800° (§ 10); il se dilate alors à peu près dans le rapport de $1 : 1 + 0,00375 \times 800$, ou de $1 : 4$: or les vides de la grille sont précisément $\frac{1}{4}$ de sa surface, il faut donc que ceux qui se trouvent entre les pierres calcaires à la base BB' donnent une section égale à la surface même de la grille. La proportion du vide au plein est chose assez variable, suivant le volume des matériaux et le soin mis dans leur arrangement; mais nous avons admis qu'il en était ici à peu près comme pour les maçonneries, où 1^{mc} de moellon de grosseur ordinaire peut contenir, sans changement sensible de volume, $0^{mc},30$ de mortier: alors, représentant par B la section de la base de la charge, le vide sera $0,30 \times B$; or ce vide est égal à la surface de la grille; donc celle-ci étant prise pour unité, on aura: $B = \frac{1}{0,30} = 3,33$; donc enfin les diamètres seront entre eux comme les racines carrées des surfaces, ou :: 1 : 1,82.

Des orifices latéraux du foyer.

§ 38. L'espace libre qui est directement au-dessous de la grille doit avoir un orifice latéral pour le passage de l'air froid nécessaire à la combustion, de l'eau à réduire en vapeur, et pour l'enlèvement de la cendre. On recommande quelquefois de prendre la section de cet orifice égale à la somme des vides de la grille; mais il est aisé de voir qu'une aussi forte proportion est inutile. En effet, soit G la surface de la grille, et par conséquent

$G\frac{1}{4}$ celle des vides; si l'on admet le coefficient 0,65 pour la contraction des filets de gaz à travers la grille, et la température de 200° pour leur échauffement dans la même circonstance, il suffira de prendre

$$\frac{1}{4}\,G \times 0{,}65 \times \frac{1}{1 \times 0{,}00375 \times 200} = 0{,}09 \times G,$$

pour avoir le même produit d'écoulement sans accélération de vitesse. Ainsi, avec une grille de $3^{mq},00$ l'orifice du cendrier deviendra: $0{,}09 \times 3{,}00 = 0^{mq},27$. Dans le four n° 6, nous l'avons pris égal à $0^{mq},25$ ou à un carré ayant $0^{m},50$ de côté. Nous ajouterons encore qu'il est indispensable de le munir d'une porte en tôle, ou d'un simple panneau en bois, pour faire l'office de régulateur pendant que la combustion s'opère dans le foyer supérieur.

L'ouverture par laquelle on introduit le combustible n'a que $0^{m},40$ en carré, et elle est séparée de celle du cendrier, dans les deux compartiments du four, par des plaques en fonte qu'on enlève, de même que les grilles, aux époques de chargement et de déchargement. Comme moyen de fermeture, une porte en tôle suffit à la rigueur; mais elle se brûle et se déforme assez vite. Le système suivant (fig. 21 et 22), nous a beaucoup mieux réussi. C'est un châssis de $0^{m},11$ d'épaisseur, dont toutes les arêtes sont des barreaux en fer forgé, de $0^{m},02$ d'équarrissage, et dont tout le vide est maçonné en briques posées à plat avec un mortier d'argile et de plâtre; seulement vers le centre on ménage un petit guichet de $0^{m},05$ à $0^{m},06$ de diamètre, par lequel on observe au besoin ce qui se passe sur la grille. Une bande de fer méplat porte les gonds de ce châssis, et lui sert d'encadrement: on la scelle dans une feuillure extérieure à l'entrée du foyer, et assez grande pour abriter du calorique rayonnant tout ce qui est fer. Avec ces précautions, les portes de four durent infiniment, sans autre réparation que celle des enduits.

De l'intervalle entre la grille et le plus grand diamètre du four.

§ 39. A $0^{m},10$ ou $0^{m},15$ au-dessus du niveau de la grille,

et dans tout son pourtour, on commence à élever les pieds-droits de la voûte en pierre calcaire, qui doit supporter toute la charge. Ces pieds-droits ne sont guère échauffés que par le rayonnement du foyer; il ne faut donc pas que leur épaisseur excède celle qui est nécessaire pour la solidité de la voûte, par exemple $0^m,30$ à $0^m,40$. Quant à la distance entre la grille et la clef de cette voûte, elle doit être réglée de telle sorte que la combustion des gaz carbonés ne soit pas interrompue par un refroidissement trop prompt. Sous ce rapport, mieux vaudrait pécher par excès que par défaut de hauteur; mais d'un autre côté, c'est à peu près au niveau de la clef que doit se trouver le plus grand évasement du four, puisque c'est là que la flamme vient d'un espace libre, ou en partie libre, dans un autre espace totalement rempli de moellons calcaires: alors il est à craindre qu'en reportant cet évasement très-haut, le massif des pieds-droits et des reins de la voûte, devenu très-considérable, ne laisse beaucoup d'incuits. Dans le four n° 6, nous nous sommes borné à $1^m,30$. Il ne serait guère possible, d'ailleurs, d'établir solidement une voûte en moellons, avec une moindre hauteur de flèche; et l'examen des fours précédents nous démontre que cette même hauteur est suffisante pour le développement de la flamme. La portion correspondante des parois a la forme d'un *talon renversé;* elle se compose de deux arcs de cercle dont l'un, inférieur, tourne sa convexité vers l'axe du four, et dont l'autre se raccorde tangentiellement avec la partie supérieure des parois. On satisfait par ce moyen aux conditions d'éviter les changements brusques de direction, et de diminuer le volume de pierre qui n'est échauffé que par la chaleur rayonnante.

Observations sur le mode de transition d'un compartiment à l'autre.

§ 40. Le rapport entre l'orifice et la base de chaque compartiment est beaucoup plus grand dans le four n° 6 que dans les premiers, à l'exception du n° 4, qui ne saurait entrer en ligne de compte. Dans ceux-ci, en effet, il s'éloigne peu de la

limite 0,228 (§ 25), tandis que dans le n° 6 il est égal à 0,40. Mais il faut observer que les hauteurs de charge sont différentes; et que, dans le n° 2, si, à 1^m au-dessous de l'orifice, c'est-à-dire en laissant encore à peu près même hauteur de charge que dans le n° 6, on évalue le diamètre, on trouve environ $2^m,40$; par conséquent la section correspondante est à la base : : $(2,40)^2$: $(3,62)^2$: : 0,44 : 1.

De ce rapport dépend surtout la capacité que l'on peut donner au compartiment supérieur, et par suite presque tout l'avantage du système de superposition. En effet, à cause de l'espèce d'étranglement de section qui existe à la hauteur de la grille et qui est indispensable pour supporter les pieds-droits de la seconde voûte en pierres calcaires, il est évident que les gaz chauds doivent changer davantage de vitesse et de direction, à mesure que le compartiment supérieur présente un évasement plus considérable; par conséquent l'uniformité de chauffage y devient de plus en plus difficile. Si l'on opère sur de la brique, comme dans le four n° 5, l'inconvénient n'est pas très-grave; mais avec de la pierre calcaire il n'en est plus de même : l'inégalité de chauffage occasionne des incuits, et, nous devons le dire, tel est le cas du four n° 6. Outre cela, aucun barreau de fonte ne peut servir de grille, et résister même une seule fois à la violence du feu; les barreaux en fer forgé ne sont point fusibles, il est vrai, mais ils se déforment et se brûlent très-promptement : il devenait donc urgent de modifier les dispositions représentées par la figure 16, pour passer d'un compartiment à l'autre. Dans ce but, nous avons fait plusieurs tentatives dont il nous reste à rendre compte.

Modifications à introduire dans le système de la fig. 16.

§ 41. Ce qu'il y a de plus simple consiste d'abord à laisser brûler le combustible debout, comme dans les fours nos 1 et 2, et appuyé sur la chaux même du compartiment inférieur. L'air qui arrive de bas en haut à travers cette chaux suffit pour la préserver de la vitrification, et pour empêcher l'accumulation

du brasier. Mais on observe alors que, le tassement produit par la calcination du calcaire faisant baisser d'environ $0^m,60$ le niveau supérieur, une certaine portion de parois se trouve à nu au-dessous de l'encorbellement qui porte la deuxième voûte, et exposée à l'action immédiate d'une chaleur très-vive; de là des dégradations assez promptes. Cet inconvénient vient donc se joindre à celui de l'inégalité de chauffage, mentionné plus haut; et c'est pour y obvier que nous avons modifié le four comme l'indique la figure 23, état dans lequel il nous a servi presque constamment.

Ayant fait disparaître de cette manière le rétrécissement brusque qui existait entre les deux compartiments, on peut augmenter la hauteur de la charge inférieure, pour compenser à peu près l'effet du tassement; mais il est à cette augmentation une limite remarquable, sur laquelle nous reviendrons tout à l'heure.

Modifications au même système, dans le cas de la cuisson simultanée de briques et de chaux.

§ 42. La difficulté de la transition d'un compartiment à l'autre disparaît totalement quand les circonstances permettent de cuire tout à la fois de la brique et de la chaux. Ce cas ayant lieu à Brest, nous y avons consacré un de nos fours, et voici comment nous procédons:

Ainsi que le représente la figure 24, on supprime toute espèce d'encorbellement, et on modifie la courbure des parois (§ 27), de manière à reporter en BB^1 l'ancien orifice AA^1, en lui conservant le même diamètre, $2^m,24$; puis on construit, pour soutenir la charge du deuxième compartiment, une voûte fixe à claire voie, comme dans le four n° 5. Cette voûte est en briques réfractaires; elle a une flèche de $0^m,60$, une épaisseur à la clef de $0^m,36$, aux naissances de $0,^m60$, et elle a la forme d'un berceau cylindrique dont les arêtes génératrices sont horizontales. Si l'on ne surveille les ouvriers dans sa construction, ils manquent rarement de poser les

claveaux par pleins et vides alternatifs sur une même ligne, parce que cette marche est la plus facile : alors, quand la voûte est incandescente, les claveaux glissent sous la charge qu'ils supportent, les vides s'effacent, et la voûte tombe. Rien de semblable n'arrive quand, au contraire, on a soin d'établir des arcs pleins, comme s'ils devaient résister chacun isolément, puis de les contre-bouter dans le sens des génératrices horizontales par un certain nombre de claveaux de remplissage. Dans la figure 25, qui représente l'extrados de la voûte, les arcs pleins ont $0^{m},25$ d'épaisseur, et les intervalles vides $0^{m},20$ environ. Enfin, la hauteur de charge du deuxième compartiment se trouvant un peu réduite, on supprime, par compensation, le col ou espace vide qui était au-dessus de la section AA^1, dans le but d'abriter les matériaux soumis à la calcination.

Observations sur l'emploi de ce dernier four.

§ 43. D'après ces dispositions, le compartiment inférieur chargé jusqu'en BB^1 contient $30,^{mc}5$ de pierres calcaires, et le compartiment supérieur, 2,900 carreaux de $0^{m},20$ de côté, et $0^{mc},05$ d'épaisseur, ou, ce qui est équivalent, 9^{mc} de pierres calcaires. Uu pareil surcroît de charge dans le compartiment inférieur n'empêche pas de se servir du deuxième foyer, parce qu'après la calcination, le niveau BB^1 descend d'environ $0^{m},70$; mais il donne lieu à des remarques importantes. 1° Pour compléter la calcination entre BB^1 et le niveau habituel AA^1, il suffit de quatre heures de feu tout au plus : or l'influence de la vapeur d'eau produite dans le cendrier inférieur peut, pendant le même temps, préserver de la vitrification la base de la charge; mais, 2°, cette circonstance, qui est très-favorable pour l'effet utile, entraîne dans un inconvénient grave. Le tirage, d'abord aussi actif que dans le four n° 6, diminue peu à peu; la fumée se charge de carbone; à la partie supérieure du deuxième compartiment, on voit que les interstices vides s'engorgent de suie, et au bout de vingt à vingt-quatre heures

il n'est plus possible de soutenir le feu : toute la flamme sort par l'entrée du foyer. Ce phénomène a également lieu, et au même degré, soit que le deuxième compartiment contienne de la brique ou de la pierre calcaire. Néanmoins, en ne renouvelant pas le combustible et en laissant la porte du foyer ouverte pour donner un libre accès à l'air extérieur, cet air s'échauffe fortement à la base du four, vient brûler la suie; et, au bout d'une demi-heure environ, on peut recommencer le feu; le tirage reprend de l'activité.

Ainsi donc, une charge totale d'environ $7^{m},00$ de hauteur refroidissant la flamme à une basse température pendant une durée assez longue, provoque l'accumulation de la suie et empêche par ce fait même d'adopter de grandes hauteurs, comme on eût été porté à le faire, d'après les considérations développées dans les § 29 et 31 ; ainsi, dans le cas particulier du four n° 7, il faut arrêter la charge en CC^1, c'est-à-dire à $0^{m},50$ environ au-dessous de BB^1, ou bien faire porter la diminution sur le deuxième compartiment, et ne pas excéder alors l'ancienne limite de charge aa'.

Tant que ce dernier compartiment ne sert que pour la cuisson de la brique, on peut à la rigueur se dispenser de faire du feu dans le second foyer; et la voûte fixe à claire voie réussit très-bien. Mais en remplaçant la brique par de la pierre calcaire, il ne faut pas moins de 15 à 16 heures de feu : alors les arceaux plus vivement chauffés prennent beaucoup de retrait; le four, au contraire, s'ouvre par l'action de la chaleur et de la charge; la voûte s'affaisse et devient promptement hors de service. Le mieux est donc de ne cuire que de la brique au-dessus de cette voûte, et de recourir au four n° 6, modifié conformément à la figure 23, quand la fournée doit être tout entière en pierre à chaux.

Des abords du four.

§ 44. Après avoir ainsi analysé tout ce qui concerne la forme de nos fours, nous allons ajouter quelques mots sur l'arrangement de leurs abords.

Le four n° 6, que nous prendrons pour exemple, est adossé à une terrasse de 7^{m} de hauteur; d'un côté, on arrive à cette terrasse par une rampe de 3^{m} de largeur, destinée principalement pour les voitures qui amènent la pierre calcaire; de l'autre côté, c'est un magasin voûté faisant plate-forme à 2^{m},10 en contre-bas de la terrasse, et donnant aux chaufourniers assez d'espace pour déposer les matériaux et le bois nécessaire au chauffage du compartiment supérieur. On monte à cette plate-forme par un escalier construit dans le pignon du magasin; de là un second escalier communique à la terrasse, et de la terrasse un troisième s'élève jusqu'au niveau de l'orifice du four. Enfin l'abord du foyer inférieur est encaissé à 0^{m},50 en contre-bas du sol naturel, ou à 1^{m} au-dessous du plan de la grille, de sorte que les hommes ne sont pas obligés de se courber d'une manière fatigante pour surveiller et alimenter la combustion.

Quelques-unes de ces dispositions sont déjà représentées sur les figures 16 et 24, mais nous y joignons (figure 25) un plan général sur l'échelle de 1/2 centimètre pour mètre; et nous dirons, pour l'intelligence de ce dernier plan, que le mur d'enceinte, tracé à 4^{m} de distance, soutient une couverture en appentis qui se prolonge jusqu'à 0^{m},50 de la paroi antérieure du four, et qui procure ainsi un hangar très-commode pour abriter les ouvriers, le combustible approvisionné pour la nuit, et la chaux pendant la durée des livraisons.

CHAPITRE III.

DE L'EMPLOI DES FOURS À CHAUX, ET DE LEURS RÉSULTATS.

De la marche suivie dans ce chapitre.

§ 45. Dans ce troisième chapitre, nous ne suivrons pas, pour l'emploi des fours à chaux, la même marche que dans le deuxième; elle nous entraînerait dans des détails et des

répétitions inutiles. Nous allons au contraire considérer tout d'abord le four n° 6 modifié; nous prendrons ses résultats pour terme de comparaison ; nous y joindrons successivement ceux des autres fours, les observations auxquelles ils conduisent, et les questions qu'ils nous ont servi à résoudre. Seulement nous réunirons dans le quatrième chapitre tout ce qui concerne la cuisson de la brique et du plâtre, dans les fours nos 3, 4, 5 et 7.

Four n° 6 modifié. — De la manière de le charger.

§ 46. Pour mettre en activité le four à chaux, la première opération consiste à le charger : cette opération est toute simple en apparence; elle nécessite cependant quelques explications sur le volume des matériaux et sur leur arrangement.

Le calcaire est exploité comme le moellon ordinaire, c'est-à-dire en fragments de dimensions extrêmement variables : les uns sont de la grosseur du poing, tandis que d'autres ont de $0^m,16$ à $0^m,20$ d'épaisseur. Afin d'éviter de nouveaux frais de main-d'œuvre, nous avons admis en principe qu'on emploierait ces matériaux tels qu'ils sortent de la carrière, et nous avons fait voir que la différence inévitable de température entre les deux extrémités de la charge donnait un moyen tout naturel de compenser le décroissement de température par le décroissement de volume des fragments calcaires, en plaçant les plus gros à la partie inférieure, et les plus petits à la partie supérieure. Outre cela, dans une même section horizontale, les parties voisines de la circonférence s'échauffent un peu moins vite que les autres; et il est bon d'y avoir égard, en rejetant vers le centre les blocs les plus volumineux. On arrive encore au même but, en disposant un certain nombre de rondins à la base de chaque compartiment, en les espaçant d'environ $0^m,40$ à $0^m,50$, et les inclinant de manière à faire cheminées d'appel vers les parois. Mais il faut éviter d'en placer à l'opposite de l'entrée du foyer inférieur, parce que la direction du courant d'air froid y pousse toujours la flamme

un peu plus qu'ailleurs. Par la même raison, cette partie doit toujours être chargée comme le centre du four.

Quant à la voûte qui soutient la charge dans chaque compartiment, on n'a pas besoin de cintre pour l'établir : on procède par assises horizontales, de telle sorte que chacune soit en saillie sur celle qui précède, et offre un plan de pose légèrement incliné. Il en résulte une espèce d'ogive. Sa hauteur sous clef ne dépend pas seulement du diamètre de la grille, mais encore de l'adresse du chaufournier. Dans le compartiment inférieur, par exemple, nous l'avons vue rarement moindre que $1^{m},50$ à partir de la grille. Mais ce qui importe davantage, c'est que pour former les pieds-droits de la voûte l'on choisisse des blocs volumineux, parce que leurs parties centrales, plus lentes à s'échauffer, restent à une température moindre que celle qu'acquerraient de petits matériaux, ce qui les préserve mieux de la vitrification; qu'ensuite, pour les rangs les plus inclinés et les plus voisins de la clef, on choisisse des pierres longues et anguleuses, afin que la voûte soit solide et en même temps très-perméable à la flamme. Cette dernière condition est nécessaire surtout au côté antérieur du four.

Enfin, quand il y a lieu d'utiliser des incuits provenant d'anciennes opérations, il faut toujours les placer vers la circonférence des parois, dans la partie basse de la charge; autrement, s'ils couvraient tout une section, ou s'ils étaient rassemblés dans les parties hautes, la chaux, qui s'en détache par l'humidité au commencement du chauffage, obstruerait les interstices réservés pour l'écoulement de la flamme, et compromettrait la fournée tout entière.

Du commencement du chauffage.

§ 47. Le four étant rempli de pierres calcaires, suivant les précautions précédentes, on met en place la grille et les plaques en fonte des entrées de foyers; on condamne par une double cloison en maçonnerie de brique le vide qui est au-

dessous de l'entrée du foyer supérieur; et on laisse seulement dans cette maçonnerie un regard, que l'on débouche au besoin, pour examiner les progrès du chauffage à l'orifice du compartiment inférieur.

Nous n'avons plus à revenir ici sur le choix du combustible. Ainsi que nous l'avons déjà dit, les fagots, les bois refendus sont ceux qui donnent la plus longue flamme, le moins de brasier, et qui par conséquent conviennent le mieux pour l'uniformité du chauffage, et pour atténuer l'effet de la chaleur rayonnante contre les moellons calcaires des voûtes.

En allumant le feu sur la grille du compartiment inférieur, on éprouve quelquefois beaucoup de difficulté pour déterminer le tirage. Cela arrive surtout pendant l'été, quand l'air ambiant est échauffé par les rayons directs du soleil. L'intérieur du four étant alors plus froid, la fumée est poussée en dehors ; mais il suffit, pour obvier à cet inconvénient, d'allumer aussitôt quelques fagots dans le foyer supérieur; par ce moyen, l'air est aspiré de bas en haut, et remplacé par d'autre moins froid; au bout de quelques instants, le calcaire du deuxième compartiment s'échauffe assez pour que le mouvement ascensionnel continue, et le foyer inférieur peut fonctionner.

A partir de cette époque, la colonne de gaz brûlés arrive dans l'atmosphère avec une température qui augmente de plus en plus; et la grille a besoin d'être rechargée fréquemment, car le tirage approche de son maximum. D'autre part, si l'on fait attention que le combustible employé, fût-il parfaitement sec, donne à peu près moitié de son poids de vapeur d'eau, résultant de l'oxigène et de l'hydrogène combinés avec le carbone, qu'en outre, s'il est coupé de l'année, il retient environ un cinquième de son poids d'humidité, on concevra sans peine comment toute cette eau, entraînée à l'état de vapeur, vient, dans les premiers instants, se condenser à la surface des pierres, et les mouiller complétement. Ce qui est encore caractéristique pour cette époque du chauffage, c'est que les pierres

ainsi mouillées deviennent noires par l'absorption du carbone contenu dans la fumée, et que celle-ci n'est plus guère colorée que par une certaine proportion de vapeur d'eau échappée à la condensation, car elle disparaît promptement dans l'espace.

Enfin c'est vers la même époque que les pierres calcaires sont toutes plus ou moins sujettes à éclater avec bruit, soit à cause de l'évaporation de leur eau de carrière, soit à cause des différences de dilatation entre la surface et les parties centrales. Avec certaines variétés de pierres, l'inconvénient peut même aller jusqu'à causer la chute des voûtes; mais on s'en préserve, en ralentissant le feu aussitôt que ces petites explosions se répètent un peu fréquemment.

De la manière d'entretenir la combustion.

§ 48. Au bout de huit ou dix heures, la dépense en combustible ne varie plus sensiblement : le mode d'alimentation de la grille reste donc uniforme, et il ne s'agit plus que d'indiquer une fois pour toutes la marche à suivre.

Les fagots que nous employons ordinairement ont à peu près 1 mètre de longueur, et pèsent de 7,5 à 10 kilogrammes. A chaque rechargement, on en introduit quatre au plus; on les dispose de préférence vers le pourtour de la grille, sauf le dernier, qu'on laisse dans l'entrée même du foyer, afin que, brûlant par son extrémité la plus avancée, il fournisse de la flamme à la partie antérieure du four, et utilise les filets d'air froid qui peuvent pénétrer par le guichet de la porte, ou par quelque défaut de fermeture.

Pour cette opération, on doit saisir l'instant où il ne reste plus guère que du brasier sur la grille, et où le courant de flamme amaigri laisse apercevoir les pierres de la voûte. Si l'on tarde davantage, l'air froid, qui arrive en quantité presque constante, s'échauffe aux dépens du foyer, et les pierres passent rapidement de l'incandescence au rouge sombre.

Quant au dosage, on peut souvent le réduire à trois fagots, mais très-rarement le porter jusqu'à cinq; car l'air affluent ne

serait plus en proportion suffisante avec la grande masse de gaz carbonés développés tout d'un coup, à cause de l'état de division de l'espèce de combustible employée. Quoi qu'on fasse cependant, et quoique les pierres de la voûte soient bien incandescentes, c'est-à-dire dans des conditions favorables pour rendre le foyer fumivore, on ne saurait éviter qu'au moment où l'on recharge, et pendant une ou deux minutes, il apparaisse de la fumée assez abondamment. Mais cette fumée, comme nous l'avons déjà expliqué (chap. 1er), contient beaucoup de vapeur d'eau; et il vaut mieux, pour l'élévation de température et pour l'effet utile, s'en débarrasser par bouffées, que d'une manière moins sensible, mais continue.

De l'introduction de la vapeur d'eau.

§ 49. Cette dernière observation perd néanmoins de son importance, 1° quand le chauffage est parvenu dans toute la masse à un degré assez élevé pour que la décomposition commence, car alors la vapeur d'eau réagit efficacement sur le calcaire; 2° quand la décomposition est assez avancée dans la partie basse de la charge pour que la surcalcination devienne imminente, car alors la vapeur d'eau est un préservatif, par cela même qu'elle modère l'intensité de la chaleur. Il s'agit donc de savoir au contraire comment on peut introduire de nouvelle vapeur en temps opportun.

Pour cela, quelques personnes recommandent d'employer la pierre tout humide encore de son eau de carrière, ou de l'arroser quand on charge le four; mais ce qui arrive dans les premiers instants du chauffage doit suffire pour convaincre de l'inutilité d'un pareil expédient; ensuite cette eau est vaporisée bien avant qu'aucune action chimique puisse se manifester. D'autres personnes conseillent d'arroser le combustible même, ou bien encore d'employer du bois vert; mais qu'en résulte-t-il? L'eau, pour se réduire en vapeur, rend latent beaucoup de calorique; alors elle refroidit brusquement la flamme, et s'oppose à la complète combustion des gaz car-

bonés. Deux conditions nous semblent donc indispensables : la première, c'est que la vapeur soit déjà toute formée avant de traverser la grille; et la seconde, c'est que, s'échauffant aux dépens de la flamme avec laquelle elle se mêle, cette vapeur ne soit pas en assez grande proportion pour abaisser la température moyenne au-dessous du degré de calcination ou du rouge-blanc de la pierre, et pour empêcher le foyer d'être fumivore. Tel est effectivement le but que nous avons voulu atteindre par la disposition particulière du cendrier dans le four n° 6. Indiquons maintenant la manière de s'en servir.

Au bout de vingt à vingt-quatre heures de feu, l'incandescence s'étant propagée jusque dans le deuxième compartiment, on remplit la cuvette qui est en avant du cendrier, à un degré assez élevé pour que le liquide vienne baigner le cendrier lui-même ; ensuite on met cette cuvette en communication avec un réservoir extérieur, au moyen d'une petite rigole en bois, et on règle l'écoulement de telle sorte que son produit compense celui de l'évaporation. Comme on le voit, rien n'est plus simple, et n'exige moins d'attention ; seulement, toutes les fois que la cendre s'entasse au-dessus du niveau de l'eau, on l'étend à l'aide d'un râble ou d'un râteau, et on la ramène dans la cuvette, où elle se refroidit complétement, et demeure jusqu'à la fin de la fournée.

Des signes auxquels on reconnaît que la calcination est terminée dans le compartiment inférieur.

§ 50. Avant que la calcination soit terminée dans le compartiment inférieur, il s'opère un tassement graduel : les pierres qui forment la voûte se fendillent; les interstices diminuent; et le niveau supérieur de la charge s'abaisse d'environ $0^m,50$. Arrivé à ce dernier point, on peut cesser le feu. Il est bon cependant d'avoir recours à des essais plus directs. Le plus simple, et, selon nous, le meilleur consiste à enfoncer une barre de fer dans la masse. Si elle éprouve une grande résistance, s'il y a choc contre les matériaux, c'est une preuve qu'il faut continuer le feu. Si, au contraire, elle pénètre aisément,

et ne fait sentir que le même effet qui aurait lieu dans une masse de gravier, la calcination est réellement complète. Il est encore possible de s'en assurer en retirant un échantillon de pierre, et le faisant fuser avec l'eau : mais ce moyen est moins commode pour les chaufourniers, et peut quelquefois induire en erreur, suivant la position que la pierre essayée occupait dans le four.

De la combustion dans le foyer supérieur.

§ 51. Pendant que l'on fait ces épreuves, on tient fermées presque totalement les entrées du foyer inférieur et du cendrier, comme si l'on voulait suspendre la combustion ; et cette même précaution doit être maintenue, du moment où il s'agit d'achever la calcination dans le deuxième compartiment. En effet, si on laisse un libre accès à l'air froid, la flamme tend à s'échapper par l'entrée du foyer supérieur; et, à chaque rechargement nouveau, il y a non-seulement perte d'effet utile, mais encore difficulté dans le travail, et danger pour les chaufourniers. Ces inconvénients disparaissent quand on parvient à n'introduire tout au plus qu'une quantité d'air égale à celle qui pourrait pénétrer directement par le deuxième foyer; car alors, au niveau de ce foyer, l'air extérieur a une élasticité au moins égale à celle de l'air intérieur; et il y a plus de chances pour admettre de l'un que pour laisser échapper de l'autre.

Quelques tâtonnements indiquent avec facilité la portion de l'orifice du cendrier qui doit rester libre, mais à coup sûr, dans le four n° 6, cette portion n'a pas un décimètre en carré. L'air froid y entre avec un bruissement sensible, fait disparaître en peu d'instants l'incandescence de la première voûte, et arrive au deuxième foyer, où la consommation de combustible est environ les $\frac{3}{4}$ de ce qu'elle était auparavant. Les fagots brûlent debout, comme nous l'avons déjà expliqué (§ 41). Quant à la vapeur d'eau, celle que peut produire encore le foyer inférieur est trop peu de chose pour entrer en ligne de compte, et malheureusement nous ne connaissons pas de moyen simple et économique pour y suppléer.

Dans ce compartiment, la durée du feu est sujette à quelques variations en passant d'une fournée à l'autre, chose qui n'a presque jamais lieu dans le premier. Quoi qu'il en soit, on reconnaît aux mêmes indices le moment où il faut cesser. On ferme alors toutes les ouvertures, afin de ne pas refroidir trop brusquement les dernières couches de pierres, dont la calcination est à peine achevée, et qui ne peuvent que gagner à ce que la chaleur prolonge son action. Au bout de dix ou douze heures, cette précaution devient inutile, et on donne un libre accès à l'air extérieur.

Résultats numériques de la dépense en main-d'œuvre et combustible.

§ 52. Afin de ne laisser aucune incertitude sur la marche de la combustion, nous donnons dans le tableau suivant un exemple des relevés qui sont faits par le maître chaufournier. Les fagots sont marqués au fur et à mesure de leur emploi ; et le décompte en est arrêté heure par heure. Ces dépenses sont groupées par durées de six heures, que l'on nomme *quarts*, et qui correspondent aux époques où les deux chaufourniers chargés du travail se remplacent tour à tour.

Compartiment inférieur du four.

1er quart.	2e quart.	3e quart.	4e quart.	5e quart.	6e quart.	7e quart.	8e quart.	9e quart.	10e quart.	11e quart.	12e quart.
Fagots 5	35	38	49	43	42	40	41	38	42	39	38
—— 15	33	40	50	40	40	40	43	40	41	40	38
—— 19	36	37	48	40	38	40	41	43	39	42	24
—— 25	34	39	50	45	42	40	39	41	42	40	//
—— 28	37	48	40	41	40	42	40	39	43	41	//
—— 31	35	51	41	44	40	40	42	40	41	44	//
Totx 123	210	253	278	253	242	242	246	241	248	246	100

Compartiment supérieur du four.

QUARTS.	NOMBRE DE FAGOTS.						TOTAUX.
1er.....	19	24	28	31	33	31	166
2e......	35	32	36	33	29	31	196
3e......	28	33	36	34	34	"	165

Le premier tableau donne au total 2,682 fagots, et 68 heures et $\frac{1}{2}$ de feu; le second, 527 fagots, et 17 heures de feu. Cependant, à cause des variations accidentelles qui se présentent d'une fournée à l'autre, voici le résultat de l'examen comparatif de 23 opérations consécutives:

	COMPARTIMENT INFÉRIEUR.			COMPARTIMENT SUPÉRIEUR.		
	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne
Durée du feu.....	68h $\frac{1}{2}$	67h $\frac{1}{2}$	68h	20h	15h	16h $\frac{1}{2}$
Dépense en fagots..	2982	2638	2758	"	"	527

Dans ce dernier tableau, nous n'avons indiqué ni maximum, ni minimum, pour la dépense en combustible du compartiment supérieur, par la raison suivante: on a employé presque constamment un mélange de fagots et de bois de démolition, dont il nous est impossible de donner une appréciation exacte. Toutefois, le nombre de fagots 527 nous paraît présenter assez approximativement la dépense moyenne.

Ajoutons enfin que la quantité d'eau vaporisée pendant la calcination s'élève environ à 3^{mc}, déduction faite des pertes par filtration à travers les maçonneries.

Conséquence relative à l'état de division du combustible employé.

§ 53. Les mêmes fournées nous ont conduit à un fait qui mérite d'être signalé, et que nous attribuons principalement à l'état de division variable du combustible employé.

Les fagots que le commerce livre au port de Brest sont en chêne; et, ainsi qu'il a été dit (§ 48), ils pèsent de 7,5 à 10^k. Sans doute les pesées moyennes qui servent de base aux recettes ne sont pas rigoureusement exactes, et n'apprennent rien sur l'état de dessiccation du combustible ; mais quoi qu'il en soit, dans les livraisons faites au poids moyen de 9^k et au-delà, comparées avec celles qui n'excèdent pas $8^k,5$, nous avons toujours remarqué une différence caractéristique. D'un côté, en effet, on ne trouve que branchages mêlés de menus rondins de $0^m,03$ à $0^m,04$ de diamètre, tout au plus; de l'autre, au contraire, on trouve généralement des rondins de $0^m,07$ à $0^m,08$ de diamètre. Cela posé, dans tous nos relevés d'expériences, nous cherchons en vain une relation constante entre le nombre et le poids des fagots consommés; c'est-à-dire que les fournées qui s'éloignent en plus ou en moins de la dépense moyenne se rapportent presque indistinctement tantôt à des fagots plus lourds, tantôt à de moins lourds. On en jugera par le tableau suivant, où nous avons en outre consigné les mois pendant lesquels on a opéré.

Poids moyen des fagots.	Nombre de fagots employés.	Époque des fournées	Poids moyen des fagots.	Nombre de fagots employés.	Époque des fournées	Poids moyen des fagots.	Nombre de fagots employés.	Époque des fournées	Poids moyen des fagots.	Nombre de fagots employés.	Époque des fournées
10^k44	2,866	Mars	10^k01	2,739	Août	8^k84	2,732	Janv.	8^k08	2,886	Janv.
10,44	2,638	Avr.	10,01	2,735	Sept.	8,53	2,661	Juill.	8,08	2,810	Déc.
10,44	2,715	Mai.	9,58	2,719	Déc.	8,38	2,834	Oct.	7,66	2,830	Oct.
10,14	2,655	Mai.	9,40	2,682	Mai.	8,38	2,781	Nov.	//	//	//
10,14	2,702	Juin.	9,26	2,782	Mai.	8,21	2,982	Mars	//	//	//
10,14	2,740	Juill.	9,26	2,692	Sept.	8,21	2,846	Avr.	//	//	//
10,14	2,751	Août	9,26	2,658	Juill.	//	//	//	//	//	//

D'après ce tableau, les saisons paraissent sans influence, et on est amené à conclure que les fagots de 9^k et au-delà, c'est à-dire ceux qui contiennent de forts rondins, sont, à poids égal, moins avantageux que les autres, c'est-à-dire que ceux qui sont formés de menus bois. Ce résultat tient sans doute à ce que, la quantité de brasier augmentant à mesure que le bois est plus volumineux, une plus grande dose de chaleur rayonnante est retenue par les couches de calcaire voisines du foyer, et à ce que le même tirage ne suffit plus pour utiliser aussi bien l'air affluent. Il serait possible néanmoins de le rapporter à quelques autres causes; par exemple, à de l'inattention dans la conduite du feu, ou bien à ce que le calcaire lui-même n'est pas toujours également facile à calciner; mais nous ne croyons pas que ces causes y jouent un grand rôle.

En résumé, les expériences précédentes font ressortir le poids moyen des fagots à $9^k,25$, et donnent pour le four, n° 6 modifié :

Pierre calcaire contenue dans les deux compartiments...	$26^{m\,c},5 + 11,5 = 38^{m\,c}$;
Durée de la calcination.....	$68^h \frac{1}{2} + 16 \frac{1}{2} = 84 \frac{1}{2}$ heures;
Poids du combustible.......	$(2758 + 527)\, 9^k,25 = 30386^k$;
Dépense par mètre cube de pierre calcaire..........	$\frac{30386}{38} = 799^k$.

De la calcination dans le four n° 6 non modifié, et dans le four n° 7.

§ 54. Le four n° 6 (fig. 16) ne diffère principalement de celui dont nous venons de décrire l'emploi que par la suppression de la grille dans l'intervalle des deux compartiments. Cette suppression était motivée et par la prompte détérioration des barreaux, et par le mauvais succès de la calcination dans le compartiment supérieur. Un pareil système devant donc être abandonné, il est sans intérêt d'entrer dans aucune discussion spéciale sur ses résultats; et nous ne le rappelons ici que pour mémoire.

Quant au four n° 7, si on le remplit uniquement de pierres calcaires, la calcination s'y opère très-bien: mais, ainsi qu'il

a déjà été dit, la voûte du compartiment supérieur ne saurait résister, et tel est le motif pour lequel on ne doit employer ce compartiment que pour la cuisson de la brique. Ce système mixte est très-commode et très-simple, lorsque le même établissement doit réunir à la fois chaufournerie et briqueterie. Dans cette circonstance, nous n'hésitons même pas à donner au four n° 7 la préférence sur le four n° 6 modifié.

La marche à suivre pour charger le compartiment inférieur, pour alimenter le feu et introduire de la vapeur d'eau, ne diffère en rien de celle qui a été décrite tout à l'heure. Seulement la hauteur de charge étant plus considérable, il faut prolonger par cela même la durée du chauffage. En définitive, on a moyennement :

Pierre calcaire contenue dans le compartiment inférieur 32^{mc};

Durée de la calcination dans ce même compartiment 72^{h};

Dépense en combustible pour *idem*, 2918^{f} de $9^{k},25$, ou 26991^{k};

Compartiment supérieur avec de la pierre calcaire, contenance 9^{mc}; durée de feu et dépense comme dans le four n° 6, modifié;

Idem, avec de la brique d'épaisseur ordinaire, durée de feu et dépense nulles.

Ce rapprochement fait sentir déjà combien l'intensité de la chaleur doit varier, suivant que l'on opère sur de la pierre calcaire ou sur de la brique. Mais il est inutile d'y insister davantage en ce moment.

Résultats obtenus dans les fours n° 1 et n° 2.

§ 55. Une première série de fournées faites dans les fours n° 1 et n° 2 nous a servi à dresser les deux tableaux suivants, dans lesquels, outre les résultats numériques, nous avons indiqué l'époque de l'année où les opérations ont eu lieu, et l'état de l'atmosphère pendant la durée de ces mêmes opérations.

Four nº 1, contenant 26^{mc} de pierres calcaires.

SAISON où l'on a opéré.	ÉTAT de l'atmosphère.	DURÉE de la calcination.	DÉPENSE pour 1^{mc} de pierres.	ESPÈCE de combustible employé.
Janvier......	Pluie intermittente.	91^{h}	1103^{k}	Fagots de chêne, et bois de démolition refendu.
Idem.......	*Idem.*	95	1026	Bois de démolition.
Février......	*Idem.*	101	1241	Fagots et bois de démol.
Mars........	Beau.	88	1049	Bois de démolition.
Idem.......	*Idem.*	88	1034	Fagots.
Avril.......	Pluie.	90	1053	*Idem.*
Idem........	Pluie intermittente.	89	1290	Fagots et bois de démol.
Mai.........	Beau.	88	974	*Idem.*
Juin........	Pluie.	107 $\frac{1}{3}$	994	Fagots.
Juillet.......	*Idem.*	89	1070	Bois de démolition.
Août........	Beau.	82	1048	Fagots et bois de démol.
Septembre...	*Idem.*	95	1163	Bois de démolition.
Octobre.....	*Idem.*	109	1077	*Idem.*
Novembre...	Pluie intermittente.	104	1070	*Idem.*
Moyennes..	//	92,7	1087	

Four nº 2, contenant 42^{mc} de pierres calcaires.

SAISON où l'on a opéré.	ÉTAT de l'atmosphère.	DURÉE de la calcination.	DÉPENSE pour 1^{mc} de pierres.	ESPÈCE de combustible employé.
Février......	Pluie intermittente.	126^{h}	1007^{k}	Fagots et bois de démol.
Idem........	*Idem.*	129	1017	Bois de démolition.
Mars.......	*Idem.*	113	1001	*Idem.*
Avril.......	*Idem.*	104	1021	Fagots.
Idem........	Pluie.	112	1239	Fagots et bois de démol.
Mai.........	Beau.	109	992	*Idem.*
Juin........	*Idem.*	106	976	*Idem.*
Août........	*Idem.*	114 $\frac{1}{2}$	945	Bois de démolition.
Septembre...	*Idem.*	114 $\frac{1}{2}$	1068	*Idem.*
Octobre.....	Pluie.	119	1099	*Idem.*
Novembre...	*Idem.*	121	1051	*Idem.*
Décembre....	*Idem.*	121	1049	*Idem.*
Moyennes..	//	115,7	1039	

Frappé des variations de durée que présentaient ces expériences, nous recommandâmes expressément aux ouvriers de maintenir la plus grande uniformité possible dans leur mode de chargement et de chauffage, et d'activer le feu de manière à abréger la durée moyenne des opérations. Une seconde série de 19 fournées, faites dans le four n° 2 seulement, donna :

Durée maximum	118 heures ;
Idem minimum	104
Idem moyenne	107,8

Observations déduites de ces résultats.

§ 56. Dans les fournées que nous venons de rapporter, on a eu occasion d'employer tantôt des fagots ordinaires, tantôt du bois de démolition de vaisseaux ; mais ce dernier était refendu et empaqueté comme les fagots. Quoique imprégné des sels contenus dans l'eau de mer, et altéré quelquefois à un degré sensible, il est d'un usage aussi profitable que les autres bois ; il en diffère seulement par la singulière facilité avec laquelle s'éteint le brasier qu'il produit.

Cela posé, si l'on fait entrer en ligne de compte les incertitudes de poids du combustible, les variations dans son état de division et d'humidité, on reconnaît de nouveau qu'il n'est guère possible d'attribuer aux saisons et à l'état hygrométrique de l'atmosphère une influence appréciable sur la dépense en combustible ; car, dans des circonstances semblables, on s'écarte des résultats moyens tantôt en plus, tantôt en moins, comme nous l'avons déjà remarqué (§ 53). Quant à la durée de calcination, dans les fours n°s 1 et 2, il n'en est plus de même que dans les fours n°s 6 et 7 ; elle varie dans des limites très-étendues, sans que toutefois il y ait de corrélation entre ces variations et celles de la dépense en combustible. Or, les chaufourniers ont pour habitude constante d'alimenter le feu *à la demande du four*, c'est-à-dire d'éviter une fumée trop épaisse, et une flamme trop maigre,

qui laisseraient également refroidir les pierres de la voûte : il faut donc en conclure que, par des causes accidentelles, le tirage peut venir entre les mêmes limites, sans nuire à l'effet utile.

Cette conséquence nous conduit à parler d'un précepte que nous avons entendu recommander, et qui a pour but de diminuer considérablement l'activité de la combustion, à mesure que la calcination approche de sa fin.

Il est bien évident d'abord qu'en laissant toutes choses égales d'ailleurs, on ne peut, sans introduire de l'air froid en pure perte, dépasser la loi de décroissement théorique (§ 20). Et en effet, dans tous les essais de ce genre, on voit l'incandescence de la pierre calcaire diminuer si rapidement qu'à coup sûr la calcination ne pourrait être achevée, si l'on persistait. En second lieu, il est très-difficile de modérer à volonté le tirage par un régulateur placé à la base du four, à cause des manœuvres fréquentes qu'exige la conduite du feu. On y supplée toutefois, en ajoutant à la partie supérieure de la charge une certaine quantité de pierres réduites en menus fragments. Mais, en définitive, l'économie de combustible n'est qu'apparente; car, ainsi qu'on le voit pour les fours n°s 1 et 2, la durée de la calcination augmente lorsque le chauffage est ralenti, et donne par cela même, pour la dépense totale, un produit constant.

Expériences faites dans le four n° 3.

§ 57. Passons maintenant au détail des expériences faites dans le four n° 3.

Les auteurs de ce système, MM. Donop et Deblinne, ont annoncé qu'avec du calcaire des environs de Paris ils pouvaient faire une fournée de chaux en 27 ou 30 heures; que la dépense en combustible était alors d'à peu près 2^{mc} de tourbe mélangée, par mètre cube de chaux; et qu'en remplaçant la tourbe par le bois, il en fallait également 2 stères. Évaluant chaque stère au poids moyen de 400^k, cette dépense serait de 800^k par

mètre cube de chaux, c'est-à-dire bien inférieure à celle que donnent les fours nos 1 et 2. Un tel exemple de promptitude d'exécution et d'économie de combustible avait inspiré de grandes espérances, à l'époque où l'on construisit, à Brest, le four n° 3; mais elles ne tardèrent pas à s'évanouir, quand on en vint à l'emploi. On se borna même aux quatre fournées suivantes:

	Pierre calcaire.	Heures de feu.	Chaux vive.
1re....	$8^{mc}9$.....	50......	$4^{mc}0$;
2e....	*idem*.....	54......	4,44;
3e....	*idem*.....	54......	4,44 à peu près;
4e....	*idem*.....	77......	Calcination bien complète.

La marche de ce four nous est assez connue par nos expériences ultérieures pour affirmer qu'il ne devrait pas consommer moins de 220^k de bois par heure: ainsi, la seule fournée qui ait réussi a coûté $\frac{77 \times 220}{8{,}9} = 1900^k$ de bois, par mètre cube de pierres. Comment interpréter l'immense supériorité des résultats de MM. Donop et Deblinne? Faisant ici la part qu'on peut attribuer à de légères différences de construction, ou à la moindre habileté des chaufourniers, n'est-il pas probable que cette anomalie réside principalement dans la différence d'état du calcaire employé? Celui des environs de Paris est d'un aspect terreux, et n'est pas réputé pour offrir beaucoup de cohésion; celui de Brest, au contraire, est d'une texture cristalline très-serrée, et nous a donné, en résistance à la rupture, 70^k par centimètre carré, c'est-à-dire plus que nos porphyres et nos belles pierres d'appareil de Ksanton: or nous avons expliqué (§ 2) comment la cohésion retarde la calcination, et comment on se soustrait à cette influence, en réduisant les matériaux en petits fragments; par ce moyen, on pouvait donc rendre les résultats comparables. En effet, après avoir préparé une quantité suffisante de fragments calcaires, on profita de la voûte fixe à claire-voie (fig. 10), pour soutenir la charge au-dessus du foyer; on barda la masse

de rondins presque verticaux, afin de faciliter le tirage ; mais on ne remplit pas le four jusqu'à l'orifice supérieur, dans la crainte de ne pouvoir calciner assez promptement les dernières portions. On obtint alors :

	Pierre calcaire.	Heures de feu.	Chaux vive.	Bois brûlé.	
5ᵉ.	6^mc,90....	25,0	3^mc 55...	5692^k ;	
6ᵉ.	7,54......	25,5.....	4, 22..	6542 .	0^mc 62 d'eau vaporisée ;
7ᵉ.	7,70.....	28,5.....	6. 44..	6788 .	0, 90.

Ces essais, le 7me surtout, sont bien supérieurs aux quatre premiers, et se rapprochent beaucoup de ceux de MM. Donop et Deblinne. Mais, sans rien préjuger sur l'effet de la vapeur d'eau introduite en dernier lieu, il n'en résulte pas moins que ce système de four n'est susceptible d'un bon emploi, avec le calcaire de Brest, qu'en augmentant les frais de main-d'œuvre ; et qu'outre ce surcroît de dépense, la quantité de bois brûlé, par mètre cube de pierre, reste à peu près la même que dans les fours nᵒˢ 1 et 2, puisque l'expérience nᵒ 7 donne encore $\frac{6788}{6,44} = 1053^k$. Donc ces derniers eux-mêmes méritent la préférence.

Comparaison de fournées faites avec ou sans vapeur d'eau.

§ 58. En comparant la fournée nᵒ 5 avec les deux suivantes, nᵒˢ 6 et 7, on est amené naturellement à rechercher si l'amélioration progressive des résultats n'est point due à l'influence de la vapeur d'eau. Mais ces mêmes fournées ne donnent pas d'indications assez précises ; la quantité de pierres employées n'était pas constante, et le feu était interrompu trop tôt. Pour y suppléer, nous avons fait charger complétement le four nᵒ 3 avec des matériaux non concassés, et nous avons trouvé :

8ᶜ... 8^m c9 de calcaire, 51 $\frac{1}{2}$ heures de feu, 1674 fagots brûlés, 3^m c d'eau vaporisée, calcination parfaite.

Ainsi la différence avec la fournée nᵒ 4 a été de 25 $\frac{1}{2}$ heures de feu, et avec les trois premières, elle a été d'une demi-calcination à une calcination complète. Toutefois, n'ayant aucune

donnée sur l'état du combustible employé et sur le mode de chargement suivi dans ces quatre essais, nous avons craint, avec raison, de nous exposer à des conséquences inexactes; et en effet, une nouvelle fournée dirigée comme la 8e, mais sans vapeur d'eau, a donné:

9e... 8^{mc}9 de calcaire, 49 heures de feu, 1496 fagots, calcination complète.

Voici également deux expériences faites dans le four n° 6, sans admettre de vapeur d'eau:

10e... 68 heures de feu, 2658 fagots;
11e... 68 ...., 2687.......

Ces nombres ne s'appliquent, il est vrai, qu'au compartiment inférieur: mais c'est le seul où la vapeur d'eau puisse avoir quelque action.

En résumé, l'expérience n° 9 rapprochée du n° 8 indique qu'il y a avantage de temps et de combustible à se passer de vapeur d'eau; mais les expériences n°s 10 et 11, comparées à celles du § 53, ne donnent aucune différence de temps, et rentrent, pour la dépense en combustible, dans les limites des variations ordinaires. Cela posé, chaque kilogramme d'eau exige 1°, pour sa chaleur latente, en passant à l'état de vapeur, 550 calories; 2°, pour s'élever à la même température que les gaz sortants, 600° environ, $0{,}85 \times 600 = 510$ calories; d'où, en somme, 1060 calories. Or, le bois ordinaire (§ 10) pouvant développer, par 1^k, 2611^{cal},6, donnant une flamme à peu près à 900°, et laissant échapper les gaz brûlés à la température de 600° admise tout à l'heure, n'a pour effet utile que $\frac{900-600}{900} \times 2611{,}6 = 870^{cal}{,}5$. On voit donc qu'il faut plus de 1^k de bois par kilogramme de vapeur, et que 3me d'eau absorbent l'effet utile de $\frac{1060}{870{,}5} \times 3000 = 3653^k$ de bois ou environ 400 fagots. Donc, puisque cette dépense assez considérable ne se trouve pas en surcroît dans les fournées n°s 9, 10 et 11, il faut bien qu'elle ait été annulée, au moins en grande partie, par l'effet chimique de la vapeur d'eau.

D'après cette discussion, il semblerait inutile de persister comme nous le faisons dans l'emploi de l'eau; mais nous y avons été déterminé par quelques considérations déjà indiquées, et sur lesquelles nous allons revenir en peu de mots. Dans les fours avec ou sans grille, conduits à la manière ordinaire, la base de la charge, et surtout la partie qui est à l'opposite de l'entrée du foyer, donnent beaucoup de chaux surcalcinée, quelquefois même vitrifiée : elle prend alors une couleur noirâtre; elle s'éteint difficilement, et ce travail moléculaire dure assez longtemps pour occasionner des mouvements dans les maçonneries. Au contraire, en se servant de vapeur d'eau, la chaux reste d'un jaune fauve remarquable et s'éteint aisément; enfin l'eau qui baigne le fond du cendrier et s'évapore continuellement empêche la grille, ses supports et les parois environnantes de rougir, et les maintient dans un état parfait de conservation.

Résumé de ce chapitre.

§ 59. Les résultats des divers fours dont il a été question dans ce chapitre forment, en résumé, le tableau suivant:

Four n° 1,	durée de la calcination pour 1^{mc} de pierre...	heures 3,56,	dépense en combustible pour *idem*.....	1087^k
Four n° 2,	*idem*.	2,75,	*idem*.	1039
Four n° 3 (avec du calcaire en menus fragments),	*idem*....	4,42,	*idem*.	1053
Four n° 6 modifié,	*idem*	2,22,	*idem*.	799
Four n° 7,	*idem*	2,15,	*idem*.	777

D'où l'on voit que les deux derniers fours ont un grand avantage sur les autres. Si maintenant on fait abstraction de leur compartiment supérieur, il restera:

Four n° 6 modifié, temps $\frac{68^h}{26,5} = 2^h,56$, combustible $\frac{25511^k}{26,5} = 962^k$;
Four n° 7......., *idem*. $\frac{72}{32} = 2,25$, *idem*...... $\frac{26991}{32} = 843$.

C'est-à-dire que l'avantage est déjà très-notable sous le rapport des dispositions adoptées pour le compartiment inférieur; mais

que l'emploi simultané des deux compartiments ajoute encore à l'économie,

Pour le four n° 6 modifié, temps 0^h,34, combustible 163^k,
Et pour le four n° 7, ... *idem* 0,10, *idem*. . . . . . 66.

CHAPITRE IV.

DE LA CUISSON DE LA BRIQUE ET DE CELLE DU PLÂTRE.

De la cuisson de la brique au moyen de la houille.

§ 60. Dans les grandes exploitations de la Belgique, du département du Nord, etc., pays dans lesquels on peut se procurer de la houille en abondance et à bas prix, on ne construit point de fours en maçonnerie pour la cuisson de la brique. Les ateliers sont établis dans le lieu même d'extraction de la terre, et, une fois que la brique est convenablement préparée et desséchée, on l'entasse artistement avec de la houille, qui tantôt remplit seulement les intervalles des briques, et tantôt est stratifiée couche par couche avec elles. On ménage en outre, de distance en distance, quelques foyers qu'on garnit de houille et de bois; on y met le feu quand l'ouvrage est monté à une certaine hauteur, et on continue à l'élever à mesure que l'incandescence se propage. Les rangs de briques extérieurs ne servent guère qu'à faire parois; mais tous les autres peuvent être convenablement cuits. Ces fours, ou plutôt ces masses, contiennent depuis 2 jusqu'à 12 et même 15 cent mille briques. Il paraît que les déchets par casse et incuits sont énormes, et excèdent quelquefois $\frac{1}{10}$ du nombre total. Nonobstant, la dépense d'extraction de la terre, du moulage et du séchage est si faible, la houille coûte si peu, que le millier de briques, prises sur place, n'est pas estimé plus de 11 à 12 fr.

Ce mode de fabrication a été décrit avec beaucoup de soin dans un ouvrage récemment publié par M. Clère, ingénieur en chef des mines; mais il ne peut être suivi quand on doit

employer du bois exclusivement, et surtout quand les besoins ou les circonstances sont telles qu'on ne doive cuire que quelques milliers de briques à la fois. En outre, dans les localités où l'on ne se procure l'argile et le combustible qu'à des prix élevés, les déchets par casse, défaut ou excès de cuisson, deviennent très-onéreux. Si l'on ne veut travailler souvent en pure perte, il est donc indispensable de procéder avec le plus grand soin.

De l'action de la chaleur sur l'argile.

§ 61. Pour cela, examinons d'abord les phénomènes que présente la terre à brique ou argile quand on la soumet à l'action de la chaleur.

Cette matière est un composé de silice, d'alumine, d'eau, de sable, de chaux carbonatée, d'oxide de fer, etc. Les deux premiers corps sont parties essentielles; les autres peuvent manquer un à un, deux à deux, ou tous à la fois, et constituent par cela même autant d'espèces particulières d'argiles[1].

Prises sur place, dans l'état ordinaire, elles sont en pâte ductile et douce au toucher; exposées à l'air, elles se dessèchent, perdent environ $\frac{1}{6}$ de leur poids d'eau, prennent du retrait, et se gercent plus ou moins. Pour éviter ces deux derniers effets, et en même temps pour accélérer la dessiccation, on les mélange avec du sable ou d'autres substances, dans des proportions que nous indiquerons plus tard (chap. VIII).

Si l'on expose brusquement à l'action du feu la brique qui n'a pas encore pris une forte consistance, elle éclate et se fendille; les parties externes, desséchées beaucoup plus vite que les autres, prennent un retrait que les dernières ne comportent pas encore; ensuite les molécules d'eau ou d'air renfermées

[1] L'argile commune de Brest, extraite à marée basse, dans la rivière du Faou, contient, suivant M. Plagne, sur 100 parties:

Silice à l'état de combinaison 55,8, alumine 32,8, oxide de fer 11,4.

L'argile blanche de Roscanvel, sur le bord de la rade, contient, suivant le même chimiste:

Silice 70,65, alumine 25,35, oxide de fer 2,50, chaux 1,50.

dans l'intérieur, venant à se vaporiser ou se dilater rapidement, s'échappent en projetant au loin les parties d'argile qui s'opposaient à leur passage : de là des déchets considérables. D'ailleurs, quelque sèche que la brique paraisse, il est rare qu'elle ne présente pas le même effet quand on élève trop promptement la température. Il importe donc de graduer le feu avec précaution, surtout dans les commencements. Passé ce terme, on observe les phénomènes suivants.

Si l'argile est ferrugineuse, de jaune ou bleuâtre qu'elle était d'abord, elle devient rose tendre, passe au rouge plus ou moins vif, au rouge pourpre, et enfin au noir, couleur et cassure de laitier. Elle augmente un peu de volume jusqu'au terme de demi-cuisson; puis au-delà elle prend un retrait toujours croissant, se déforme et se vitrifie.

Si l'argile ne contient pas d'oxide de fer en quantité notable, mais du carbonate de chaux, on ne peut plus aussi bien juger du degré de cuisson par le simple aspect : la brique reste constamment d'un blanc sale. Elle est néanmoins susceptible de se vitrifier, parce que la chaux à une haute température est, comme l'oxide de fer, attaquée par la silice.

Dans cette circonstance, la vitrification se produit d'abord comme un vernis à la surface extérieure de la brique, et se propage ensuite vers les parties centrales. C'est généralement l'inverse avec les argiles ferrugineuses : les briques qui n'ont éprouvé qu'un commencement de vitrification sont déformées comme par une espèce d'ampoule, et, en les cassant, on voit que le bord est d'un rouge foncé, tandis que le centre est comme du laitier. Cet effet s'explique aisément, en faisant attention que dans les argiles le fer est à l'état d'hydrate de protoxide ou de deutoxide; que cet hydrate se décompose par la chaleur, et qu'au moyen de l'oxigène de l'air, il passe peu à peu à l'état de peroxide. Ce n'est ensuite qu'à une très-haute température que le peroxide de fer abandonne, par l'influence de la silice, une portion de son oxigène pour repasser à l'état de protoxide, et se combiner avec elle. Or, si la

température de la brique s'élève rapidement, après que l'hydrate de fer des parties centrales a été décomposé, l'oxigène n'a pas le temps d'atteindre ces parties : donc elles se vitrifient avant d'avoir passé à l'état de peroxide comme les parties externes. Nous avons même remarqué cette différence dans les briques bien cuites et non déformées: la cassure n'est pas homogène; le centre seul est déjà rouge pourpre, et d'un aspect plus ou moins vitreux, tandis que le reste a encore les caractères de la brique demi-cuite.

Enfin, les argiles qui ne contiennent ni chaux, ni oxide de fer, d'une manière sensible, forment une classe à part, et jouissent du précieux avantage d'être infusibles : on les nomme pour cette raison *argiles réfractaires*. Elles sont généralement blanches ou légèrement colorées; elles prennent moins de retrait que les autres et se déforment plus difficilement. Pour les briques faites avec une pareille matière, un excès de cuisson n'a donc d'autre inconvénient que d'occasionner une dépense inutile en combustible; mais la rareté de ces argiles doit les faire considérer comme un heureux hasard, et nous ne devons pas raisonner dans un cas aussi restreint.

Quand la brique est vitrifiée, elle ne happe plus à la langue; elle ne fait plus aussi bien corps dans les maçonneries; elle n'est plus d'ailleurs susceptible d'emploi, parce qu'elle est trop déformée et trop difficile à tailler. Quand elle n'est pas assez cuite, en l'exposant pendant un temps plus ou moins long aux intempéries de l'air, elle se délite, et paraît même reprendre en partie la propriété de faire pâte avec l'eau; elle cède aisément à la gelée, et n'offre qu'une faible résistance à la rupture. Ainsi, dans ces deux cas extrêmes, on n'a que de mauvais produits, et on reconnaît combien il importe d'atteindre, sans le dépasser, le terme le plus convenable de cuisson.

Four n° 5. — De la manière d'y arranger la brique.

§ 62. Cela posé, indiquons maintenant les détails de

cette opération dans le four n° 5, four exclusivement consacré pour la brique, et auquel nous recourons toutes les fois que les circonstances ne nous permettent pas d'employer le four n° 7.

La fragilité des briques sèches exige qu'on les pose une à une, et qu'on les dresse de champ, c'est-à-dire dans le sens de leur plus grande résistance. Leur espacement ne doit pas être le même dans les diverses parties du four; il doit être plus grand vers les parois que vers le centre, dans la partie supérieure de la charge que dans la partie inférieure; au reste, cette disposition est analogue à ce qui se pratique dans un four à chaux pour l'emploi des fragments calcaires d'inégal volume.

On devient maître par ce moyen de faire varier à volonté le rapport du vide au cube total; mais en définitive, on ne saurait sans inconvénient dépasser certaine limite, qui (chose remarquable) est à peu près la même que celle qu'on obtient naturellement dans un four à chaux. Quand on va au-delà, on facilite le tirage; mais le courant de flamme n'est plus aussi bien divisé, et le combustible ne donne plus autant d'effet utile. Quand on reste en dessous, le tirage diminue, et la durée du travail augmente sans compensation d'aucune économie; aussi, comme on le verra bientôt par des exemples, ces deux cas sont également à craindre.

En prenant une moyenne d'après les fournées qui ont le mieux réussi, nous trouvons:

Pour le compartiment inférieur . . 6200 briques plates, ou 2200 briq. creuses;

Idem........ supérieur.. 2800 ...., ou 1040 ....

Or la brique plate, bien sèche, cube $1^{lit},375$, et après bonne cuisson $1^{lit},265$,

La brique creuse, *idem*.......... 3,906, ... 2,456;

Les capacités étant à peu près de 13^{mc} pour l'un des compartiments, et de 6^{mc} pour l'autre, on aura donc pour le rapport du volume total des briques aux capacités:

Compartiment inférieur.....	Briques plates, avant la cuisson,	$\frac{6200 \times 1,375}{13} = 0,655;$
	Idem........, après la cuisson,	$\frac{6200 \times 1,265}{13} = 0,603;$
	Briques creuses, avant la cuisson,	$\frac{2200 \times 3,906}{13} = 0,661;$
	Idem........, après la cuisson,	$\frac{2200 \times 3,456}{13} = 0,633.$
Compartiment supérieur....	Briques plates, avant la cuisson,	$\frac{2800 \times 1,375}{6} = 0,641;$
	Idem........, après la cuisson,	$\frac{2800 \times 1,265}{6} = 0,590;$
	Briques creuses, avant la cuisson,	$\frac{1040 \times 3,906}{6} = 0,677;$
	Idem........, après la cuisson,	$\frac{1040 \times 3,456}{6} = 0,599.$

Ainsi le vide varie depuis 0,33 jusqu'à 0,40 du cube total, et encore, pour ce dernier nombre, faut-il remarquer qu'après la cuisson le niveau supérieur de la charge est abaissé par le fait même du retrait linéaire des briques.

De la manière de conduire la combustion.

§ 63. Le four étant chargé, il s'agit d'opérer la cuisson. Les ménagements à apporter dans cette partie du travail dépendent non-seulement de la nature et du degré de dessiccation de l'argile, mais encore de la manipulation qu'elle a subie. Il est constant, par exemple, que la brique creuse supporte un feu vif plus difficilement que la brique ordinaire; qu'alors des fissures se manifestent dans des joints qui paraissaient bien soudés, et que de cette manière une fournée est quelquefois totalement compromise. L'état du combustible a aussi de l'influence: autant que possible, il faut choisir des bois secs et menus, des fagots de simples branchages, afin d'avoir une flamme longue et peu de brasier.

Quant à la conduite du feu, il nous suffit d'ajouter aux considérations déjà données pour la calcination de la chaux un relevé, heure par heure, de la dépense en combustible pour une fournée de briques plates et pour une de briques creuses. Tel est le but des tableaux suivants:

Fournée de briques plates.

	COMPARTIMENT INFÉRIEUR DU FOUR.							COMPARTIMENT SUPÉRIEUR.
	1er quart.	2e quart.	3e quart.	4e quart.	5e quart.	6e quart.	7e quart.	1er quart.
Nombre de fagots.	10	23	31	26	31	30	32	16
	13	24	28	28	28	32	//	18
	17	26	27	30	30	28	//	17
	15	28	29	32	27	30	//	20
	19	27	31	29	29	29	//	//
	21	29	27	29	27	30	//	//
Totaux.	95	157	173	174	172	179	32	71

Fournée de briques creuses.

	COMPARTIMENT INFÉRIEUR DU FOUR.						COMPARTIMENT SUPÉRIEUR.
	1er quart.	2e quart.	3e quart.	4e quart.	5e quart.	6e quart.	1er quart.
Nombre de fagots.	4	10	22	30	28	30	14
	4	13	25	28	31	28	16
	5	15	23	30	29	31	21
	7	13	26	32	27	29	24
	9	15	28	29	29	//	//
	11	18	27	30	32	//	//
Totaux..	40	84	151	179	176	118	75

L'ouverture du cendrier inférieur n'a que $0^{m},40$ en carré; il faut néanmoins la munir d'un registre, et, pendant que le feu est dans le foyer inférieur, ne laisser tout au plus que $\frac{1}{3}$ de l'espace libre pour le passage de l'air froid. Quand on reporte la combustion dans le deuxième foyer, il faut, comme on le pressentait aisément, que la même ouverture soit fermée presque hermétiquement.

De la dépense en main-d'œuvre et en combustible

§ 64. Le premier des tableaux ci-dessus indique pour la brique plate une durée de feu de 41 heures, tandis que le second ne donne que 38 heures pour la brique creuse. Ces nombres ne sont cependant pas invariables d'une fournée à l'autre, et on peut poser en fait qu'il faut le même temps pour les deux espèces de briques, c'est-à-dire 36^h environ dans le compartiment principal et 4^h dans l'autre. Un pareil résultat s'explique tout naturellement par les ménagements qu'il faut prendre, suivant le degré de dessiccation des briques, et par l'incertitude où peut rester le chaufournier, après avoir retiré des échantillons d'essai. Par la même raison, la dépense en combustible ne saurait être constante; mais, en principe, cette dépense doit toujours être établie en ayant égard à la nature de l'argile et au degré de cuisson des produits : sans cela, les résultats ne signifieraient rien, et la plus mauvaise fournée serait en apparence la plus économique.

Celles que tout à l'heure nous avons prises pour exemple ont parfaitement réussi : à peine a-t-on eu quelques briques de déchet, et la cuisson, sans être à un égal degré dans toute la hauteur du four, n'a cependant laissé rien à désirer. Depuis que nous sommes parvenu, après plusieurs essais infructueux, à reconnaître la manière d'opérer la plus convenable, nous avons recueilli un grand nombre de nouveaux résultats; mais les différences étant peu de chose, nous nous bornerons à déduire des deux précédents le poids de combustible qu'exige la bonne cuisson d'une brique plate ou creuse.

Les fagots employés pesaient $8^k,9$, terme moyen; il vient donc :

Pour une brique plate... $\frac{1053 \times 8,9}{6200 + 2800} = 1^k,04,$

Et pour une brique creuse $\frac{823 \times 8,9}{2200 + 1040} = 2,26.$

Les volumes de ces briques sont entre eux : : 1,265 : 3,456 (§ 62); ils ne sont donc pas dans le rapport des dépenses;

mais la raison en est évidemment à ce que, dans le premier cas, l'épaisseur d'argile est au moins de $0^m,05$, tandis que dans le second elle est de $0^m,03$ au maximum.

Influence de la manière de charger le four et de conduire la combustion.

§ 65. Nous nous proposons maintenant de montrer qu'avec le même four, chargé ou chauffé différemment, on n'est conduit qu'à des résultats moins avantageux.

1° On avait disposé la charge de manière à remplir complétement l'œil de chaque compartiment, et les briques étaient plus serrées dans le compartiment supérieur que dans l'autre. Le tirage fut très-faible, quoique l'entrée du cendrier fût restée libre jusqu'au moment d'allumer le feu sur la seconde grille; et on eut :

	BRIQUES plates employées.	DURÉE du feu.	COMBUSTIBLE brûlé.	BRIQUES demi-cuites.	BRIQUES cassées.	DÉPENSE pour une brique.
Compartiment inférieur	6,040	45^h	$9,100^k$	3,320	70	$1^k,33$
Idem supérieur.......	3,280	24	3,348	//	50	

On remarquera sans doute que ce résultat offre beaucoup d'analogie avec celui que nous avons déjà discuté (§ 43).

2° Afin d'avoir un meilleur tirage, on chargea seulement jusqu'à $0^m,50$ au-dessous de chaque orifice, et on laissa plus d'intervalle entre les briques, surtout dans le compartiment inférieur. L'entrée du cendrier resta libre comme précédemment. Il vint :

	BRIQUES plates employées.	DURÉE du feu.	COMBUSTIBLE brûlé.	BRIQUES demi-cuites.	BRIQUES cassées.	BRIQUES vitrifiées.	DÉPENSE pour une brique.
Compartiment inférieur	5,260	43^h	$8,328^k$	591	59		$1^k,26$
Idem supérieur:......	2,732	8	1,743	//	105	260	

3° Les briques furent encore plus espacées; et quoique l'on eût réglé convenablement l'entrée du cendrier, voici le résultat qu'on obtint :

	BRIQUES plates employées.	DURÉE du feu.	COMBUSTIBLE brûlé.	BRIQUES demi-cuites.	BRIQUES cassées.	DÉPENSE pour une brique.
Compartiment inférieur	4,800	49h	10,497k	480	20	1k,73
Idem supérieur......	2,300	12	1,809	470	50	

4° On prit des briques creuses; on laissa entre elles beaucoup de vide, comme tout à l'heure; mais on activa le feu plus que de coutume. On trouva :

	BRIQUES creuses employées.	DURÉE du feu.	COMBUSTIBLE brûlé.	BRIQUES vitrifiées.	DÉPENSE pour une brique.
Compartiment inférieur	1,770	34h	7,530k	240	3k,04
Idem supérieur......	796	2	267	//	

Expériences sur diverses dispositions de fours.

§ 66. Les résultats que nous venons de rapporter n'ont pas besoin de commentaire; seulement, pour compléter ce mode d'analyse, nous allons indiquer des expériences relatives à d'autres dispositions de fours.

1° Le four n° 4 (§ 31), avec ses trois compartiments et ses deux foyers à flamme recourbée, donna dans une première expérience :

Pour les deux compartiments inférieurs, 3,000 briques creuses environ, 84 heures de feu et 14,400 kilogrammes de bois brûlé.

Le troisième compartiment, ne pouvant guère servir que comme séchoir, contenait seulement quelques rangs de briques. En définitive, la cuisson était extrêmement inégale; les briques

étaient vitrifiées dans la partie voisine de chaque foyer, et n'étaient pas cuites dans la partie opposée.

2° Dans le même four, la voûte du troisième compartiment fut démolie, et les deux foyers furent reportés directement au-dessous de chaque charge. Il vint alors :

	BRIQUES creuses employées.	DURÉE du feu.	COMBUSTIBLE brûlé.	BRIQUES peu cuites.	BRIQUES cassées.	BRIQUES vitrifiées.	DÉPENSE pour une brique.
Compartiment inférieur	1,530	50^h	$9,140^k$	670	//	30	$3^k,44$
Idem supérieur......	1,900	12	2,654	550	//	80	
Compartiment inférieur	1,616	$25\frac{1}{2}$	5,766	100	290	50	$2^k,25$
Idem supérieur......	2,120	15	2,645	130	6	//	

Ces deux fournées différaient essentiellement par la manière d'entretenir le feu; mais ni l'une ni l'autre de ces manières ne conduisit à rien de passable.

3° On supprima la seconde voûte, afin de n'avoir plus qu'un seul compartiment; mais on donna à la charge une hauteur plus considérable, et on eut :

7,185 briques plates, 67 heures de feu, 10,918 kilogrammes de bois brûlé, 3,100 briques peu cuites, 85 cassées ou vitrifiées, $1^k,538$ de bois dépensé par brique.

4° Pour éviter d'avoir une aussi grande quantité de briques peu cuites, on éleva la charge en pyramide, laissant ainsi un vide entre elle et les parois du four. Il vint :

BRIQUES plates employées.	DURÉE du feu.	COMBUSTIBLE brûlé.	BRIQUES peu cuites.	BRIQUES cassées ou vitrifiées.	DÉPENSE pour une brique.
7,900	67^h	$12,387^k$	500	60	$1^k,58$
10,500	60	14,196	//	80	1 ,36
10,700	60	12,662	//	93	1 ,19

Les briques des deux dernières fournées étaient faites avec de l'argile mêlée d'un tiers de son volume de sciure de bois. Quoique le degré moyen de cuisson fût médiocre, ces résultats nous firent voir qu'avec un feu modéré et longtemps soutenu, il était possible d'opérer, non-seulement sur une grande hauteur de charge, mais encore sans parois enveloppantes, ainsi que nous avons déjà eu occasion d'en parler.

5° Enfin on essaya l'emploi du four n° 1 pour la cuisson de la brique creuse; il fallut,

Pour 2,700 briques creuses, 74 heures de feu, et 9,318 kilogrammes de combustible brûlé, d'où $3^k,45$ par brique.

Mais nous dirons de cette expérience, comme des précédentes, que le degré et l'uniformité de cuisson n'étaient pas comparables à ce qu'on obtient dans le four à compartiment n° 5; et qu'en définitive ce dernier présente, non-seulement supériorité dans ses produits, mais encore économie de temps et de combustible.

6° Il faut excepter néanmoins de cette conclusion le four n° 7, où la cuisson de la brique s'opère tout aussi bien que dans le four n° 5, et avec une dépense de combustible beaucoup moindre. En effet la consommation totale étant de 26,991 kilogrammes (§ 54), si l'on en déduit pour 32^{mc} de pierres calcaires la quantité qu'exigerait le four n° 6 modifié, ou $32 \times 799^k = 25568$ (§ 53), il reste, pour la charge de briques dans le compartiment supérieur, $26991 - 25568 = 1423^k$. Or ce compartiment contient, terme moyen, 4,030 briques ordinaires, donc chacune ne coûte que $\frac{1425}{4030} = 0^k,35$ de combustible.

L'emploi de ce four n° 7 ne donnant lieu à aucune observation importante qui n'ait déjà été rapportée, nous n'y insisterons pas davantage; nous dirons seulement que, dans certains cas, lorsqu'on veut cuire des briques de forte épaisseur, il est utile, pour atteindre le degré de chaleur convenable, de faire deux ou trois heures de feu dans le foyer supérieur; la voûte fixe n'en souffre pas d'une manière sensible, et on évite par là toute surcalcination de la chaux dans le premier compartiment.

De la cuisson du plâtre dans le four n° 3.

§ 67. La cuisson du plâtre est une opération facile; aussi nous ne dirons que peu de mots à ce sujet. La pierre à plâtre, telle qu'elle nous vient de Montmartre, est un sulfate de chaux contenant un cinquième de son poids d'eau de cristallisation, plus une petite proportion de carbonate de chaux, qui passe pour contribuer beaucoup à son excellente qualité. Cette pierre a une densité égale à 2,30, celle de l'eau étant prise pour unité. La cuisson a pour but de la débarrasser de son eau, en totalité ou en partie seulement. Il suffit d'une assez faible incandescence pour arriver à un pareil résultat. Alors les fragments volumineux donnent toujours un noyau moins cuit que la portion enveloppante; mais on sépare l'un et l'autre avec soin : le premier sert à confectionner ce qu'on nomme *plâtre fin*, et le reste se convertit en *plâtre gris* ou *commun*, bon pour les dégrossissages, etc. Cette matière réduite en poussière absorbe l'eau avec avidité; et par suite, plus on la laisse vieillir sans emploi, plus elle perd de son énergie : aussi n'en doit-on préparer que peu à la fois, et réservons-nous pour cela le four n° 3, dont la capacité n'excède pas 9^{mc} : nous ne le chargeons même jamais complétement jusqu'à l'orifice.

Voici, pour une fournée de 8^{mc}, la marche de la combustion :

1re heure	13	fagots.
2^{e}	20	
3^{e}	28	
4^{e}	27	
5^{e}	26	
6^{e}	27	
7^{e}	28	
8^{e}	26	
9^{e}	28	
10^{e}	30	
TOTAL	253	

Dans cette expérience, le poids moyen des fagots était de $8^k,7$; ce qui donne une dépense totale de $253 \times 8,7 = 2201^k$ pour les 8^{mc} de pierre, et par suite, de 275 kilogrammes pour 1^{mc}. Il a suffi, comme on le voit, de dix heures de feu.

Enfin, quand la pierre à plâtre est transportée au loin, elle donne une assez forte dose de menus débris et de poussière, en raison de sa friabilité. Ces débris et cette poussière ne peuvent être chauffés dans le four même, parce qu'ils obstruent les interstices vides, et s'opposent au tirage : c'est alors, pour en tirer parti, que nous recourons à l'emploi d'un four nouveau, celui qui nous sert ordinairement pour la préparation des pouzzolanes factices, et que nous décrirons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V.

DE LA PRÉPARATION DES POUZZOLANES FACTICES, ET PARTICULIÈREMENT DE CELLE DE SABLE DE GNEISS.

Des différentes espèces de pouzzolanes.

§ 68. Le rôle important que les pouzzolanes jouent dans la confection des mortiers hydrauliques indique assez l'intérêt que nous devons apporter dans l'examen de la question énoncée. On ne connaissait jadis que ce seul moyen d'avoir des mortiers susceptibles de faire prise sous l'eau; et même, depuis qu'on a fait une étude particulière des chaux hydrauliques, on n'a pas moins continué celle des pouzzolanes, parce que les chaux hydrauliques ne se trouvent pas, à beaucoup près, dans toutes les localités, et qu'il n'est pas toujours possible ou économique d'en fabriquer de toutes pièces; parce qu'enfin, dans plus d'une circonstance, elles ne donneraient que de médiocres résultats, si on ne les mêlait avec une certaine dose de pouzzolane.

On peut ranger les pouzzolanes en deux catégories principales : les unes sont naturelles, et les autres artificielles.

Parmi les premières, les plus énergiques sont généralement des matières volcaniques de composition analogue à celle des argiles. On en a découvert d'abord en Italie, où leur usage remonte à un temps immémorial, et plus tard dans les pays de volcans éteints, tels que l'Auvergne, le Vivarais, la Guadeloupe, etc. Les corps dont elles proviennent ont subi par l'action du feu un changement dans le mode de combinaison primitive de leurs éléments ; mais comme l'intensité de cette action n'a pu être partout identique, il en est résulté des produits d'une cohésion très-variable ; et l'on conçoit sans peine comment il se trouve des différences très-grandes dans leurs qualités, lors même qu'il n'en existe pas dans leur composition chimique.

Néanmoins il est possible qu'une pouzzolane ne soit médiocre que, comme on le dit vulgairement, parce qu'elle est encore trop *jeune*. Certaines influences peuvent agir avec le temps, et amener une désagrégation, là où il y avait une cohésion trop grande. Ce phénomène n'est pas sans exemple dans la nature : la plupart des roches feldspathiques sont dans ce cas, et donnent alors naissance à une seconde variété de pouzzolane. Tels sont particulièrement les grauwackes de Carhaix, les arènes du Périgord et nos sables de gneiss. Le gisement de ces substances, ou du moins du gneiss que nous avons à Brest sous nos yeux, ne permet d'admettre aucune action ignée. La désagrégation se produit peu à peu, et on prend en quelque sorte la nature sur le fait ; car dans les carrières, depuis les parties supérieures qui sont à l'état de sable, jusqu'à celles qui sont à l'état de roche bien vive, il n'est pas rare de trouver une série de couches à tous les degrés intermédiaires de cohésion.

Ces nouvelles pouzzolanes sont peu énergiques ; mais en les torréfiant, on parvient à les rendre, sinon égales aux premières, du moins susceptibles de presque tous les mêmes usages : elles passent alors dans la catégorie des pouzzolanes artificielles

Dans cette catégorie on doit également ranger les schistes compactes et même les basaltes, quand on les chauffe fortement. C'est en effet le moyen dont se servaient pour leurs travaux M. Gratien Lepère et l'ingénieur suédois Baggé. Enfin toutes les argiles, considérées soit comme provenant de la décomposition des roches, soit comme formant des terrains particuliers, conduisent encore au même résultat par l'action de la chaleur.

Il est peu de localités dépourvues d'argile : de là l'usage général et très-ancien des poudres de tuileaux ou de briques pilées. On peut aujourd'hui leur substituer avec économie les sables de grauwacke, d'arène, de gneiss; mais ces dernières substances sont moins communes. Par leur emploi, la question ne change pas de face; seulement son domaine s'agrandit considérablement.

Dans toutes ces pouzzolanes, naturelles ou factices, ce sont les éléments de l'argile, silice et alumine, qui déterminent les qualités hydrauliques; de plus, la silice seule, en gelée ou légèrement torréfiée, mais à l'état de division extrême, donne, par son mélange avec la chaux commune, un bon mortier hydraulique, tandis qu'il n'en est pas de même avec l'alumine : on peut donc dire en définitive que la silice est la base de toutes les pouzzolanes, et que réciproquement toutes les substances contenant de la silice à l'état de faible cohésion sont aptes à devenir pouzzolanes.

Des diverses méthodes usitées pour la préparation des pouzzolanes factices.

§ 69. L'étude des qualités et de l'emploi des pouzzolanes naturelles n'ayant pas de rapport immédiat avec la question qui doit nous occuper en ce moment, nous nous bornerons à parler des pouzzolanes artificielles. Et d'abord indiquons les diverses méthodes applicables à leur préparation.

Les matières auxquelles on a recours peuvent être soumises à l'action de la chaleur, 1° à l'état de poudre ou de sable; 2° à l'état de fragments, briques ou moellons. Dans le pre-

mier cas, toutes les argiles réfractaires, ocreuses ou calcaires, peuvent donner de bonnes pouzzolanes par une torréfaction de quelques instants. Il suffit pour cela de répandre la poudre en couche mince sur une plaque en tôle, et de la maintenir en incandescence pendant une durée de 5 à 25 minutes. M. Vicat, à qui l'on doit la connaissance de cette méthode, ajoute néanmoins qu'elle n'a pas encore été appliquée en grand, et qu'elle offre alors des difficultés. M. Girard de Caudenberg assure, d'après ses propres expériences, que les sables d'arènes torréfiés légèrement augmentent la vitesse de prise des mortiers, mais aucunement leur dureté. Toutefois cette conséquence ne s'appuyant que sur un cas particulier de torréfaction, rien ne prouve qu'elle soit vraie en général, pas plus pour les sables d'arènes que pour ceux de grauwacke ou de gneiss.

Dans le second cas, les matières sont employées, tantôt pures, c'est-à-dire telles que la nature les donne, et tantôt mélangées préalablement avec certains corps destinés à faciliter la réaction chimique. Cela posé, nous voyons, d'après M. Treussart, que l'argile calcaire amenée au degré de la brique peu cuite donne de bons résultats, et que, depuis ce degré jusqu'à celui de la plus forte cuisson, son énergie diminue rapidement, et finit par être nulle; que pour l'argile ocreuse, au contraire, la brique peu cuite donne des résultats très-médiocres; mais que ces résultats s'améliorent progressivement jusqu'au degré de cuisson de la bonne brique, et au-delà de ce terme décroissent indéfiniment; qu'enfin les argiles réfractaires donnent aussi d'excellentes pouzzolanes, au degré de cuisson de la bonne brique, mais résistent mieux que les argiles ocreuses à l'effet d'une plus forte incandescence, et n'ont pas encore perdu sensiblement de leur qualité au terme de calcination de la chaux commune. Par suite, il est à supposer qu'elles atteignent moins vite leur maximun, et telle est sans doute la cause pour laquelle Chaptal, soumettant au même mode de chauffage de l'argile réfractaire, tantôt pure, et tantôt mêlée avec du sulfate de fer, ce qui produit l'équiva-

lent d'une argile ocreuse, avait trouvé des résultats différents, et conclu que l'oxide de fer était un élément essentiel au succès de l'opération en général.

Les argiles à la fois ocreuses et calcaires, mais contenant au moins un dixième de leur poids de chaux, n'ont, comme les argiles simplement calcaires, besoin que d'une faible cuisson (Treussart). On peut ainsi, par cette faible cuisson, obtenir de bonne pouzzolane avec une argile ocreuse, en l'imprégnant d'une certaine quantité de chaux, suivant la recommandation de l'inspecteur général Bruyère. On peut même, avec un égal succès, remplacer la chaux par la potasse ou la soude; et tel est, par exemple, ce qu'on nomme *ciment d'eau forte*, ou résidu provenant de la préparation de l'acide nitrique, au moyen d'argile et de nitrate de potasse.

Dans les chantiers du canal de Nantes à Brest, on fait subir à la grauwacke en moellon un degré de chaleur analogue à celui qu'exige la bonne brique. Enfin, d'après M. Vicat, le schiste bleu demande une incandescence telle qu'il se boursoufle, et le basalte doit couler.

Pour le chauffage de toutes ces matières en fragments, on peut se servir de fours à chaux ou à briques. Malheureusement l'uniformité du chauffage n'étant pas parfaite dans un même four, il en résulte qu'on a pêle-mêle des fragments qui pèchent par défaut ou par excès de cuisson, et par suite un mélange de bonne et mauvaise pouzzolane, ou en définitive un tout médiocre, ou du moins bien inférieur à ce qu'on obtient dans les essais de laboratoire.

Si à cela on ajoute la dépense nécessaire pour pulvériser et tamiser ces mêmes fragments, on sentira combien il importe de pouvoir appliquer en grand la méthode de M. Vicat; car alors rien n'est plus facile que d'arriver à un degré uniforme de torréfaction, et les produits n'ont plus besoin d'aucune espèce de manipulation Tel est en effet le but que nous nous sommes proposé en construisant le four dont la description va suivre. L'abondance de sable de gneiss dans les carrières

du port de Brest nous donnait d'ailleurs un moyen tout simple d'éviter les frais de pulvérisation préalable, et en même temps nous sommes parvenu à utiliser l'immense quantité de copeaux que produisent les constructions navales [1].

Description du four à pouzzolane factice.

§ 70. Le four dont nous voulons parler est représenté dans tous ses détails par les huit figures comprises depuis le n° 27 jusqu'au n° 34 inclusivement; il est du genre des fours à réverbère, et peut marcher à feu continu. Sa construction est très-simple: de la maçonnerie ordinaire de moellon, avec mortier de chaux et sable, forme le massif principal et les parois de la cheminée; seulement la voûte et quelques autres parties sont en maçonnerie de briques. La cheminée présente cela de particulier que le vide intérieur, jusqu'à 1 mètre environ au-dessus du niveau de la rampe ménagée pour les approvisionnements, est divisée en trois compartiments, au moyen de deux cloisons un peu cintrées, en briques posées à plat, sans mortier, pour faciliter la transmission de la chaleur, mais coincées fortement. C'est dans le compartiment du milieu, débouchant au niveau de la terrasse, qu'on jette le sable au fur et mesure des besoins. Les deux autres compartiments servent d'issue à la fumée. On voit que de cette manière le sable s'échauffe déjà avant d'arriver à la base de la cheminée. Cependant, quand il a été mouillé par la pluie, il s'agglutine, adhère aux cloisons, et reste suspendu comme une masse solide : il faut alors détruire cette adhérence, et on y parvient aisément, en ménageant un ou deux regards dans le mur de cheminée, et introduisant par là une fourche en fer, ou même un simple bâton en bois. Ensuite, pour empêcher qu'il ne tombe à l'arrière de la sole du four en trop grande quantité à la fois, et n'obstrue les passages latéraux, nous n'avons laissé libre

[1] Une description succincte de ce même four et de son emploi a déjà été imprimée dans les *Annales maritimes*, tome II, 1830.

qu'une partie de la base du compartiment moyen; le reste est garni de barreaux en fer, comme une grille. Parvenu à ce point, le même sable est tiré, à l'aide d'un long ringard qu'on introduit par l'autre extrémité du four, et il est répandu sur toute la sole en zones ondulées de $0^m,04$ à $0^m,08$ d'épaisseur. Quand il est suffisamment torréfié, on le ramasse dans le puisard qui avoisine le foyer, et qui débouche, au niveau du fond du cendrier, par une petite ouverture de $0^m,20$ à $0^m,25$ en carré. De là on le retire à loisir, pendant qu'une autre fournée s'opère, et on le porte en magasin. Ajoutons cependant qu'on ne doit jamais vider complétement ce puisard; autrement il donnerait passage à un courant d'air froid très-nuisible.

Détails relatifs à l'établissement des diverses parties du four.

§ 71. Entrons maintenant dans quelques détails sur l'établissement des diverses parties de ce système de four.

L'ouverture par laquelle on introduit le sable de gneiss au niveau de la terrasse n'a pas besoin de porte; mais on garnit de mortier les derniers rangs de briques et la petite voûte qui recouvre les cloisons, afin de ne pas y laisser d'issue à la fumée. Les deux petits regards, qui servent dans les moments où le sable s'écoule avec peine, sont munis de portes en tôle, seulement pour empêcher le sable de tomber au-dehors du four; car d'ailleurs la perte de calorique serait insignifiante. On ménage une ouverture dans la paroi du four avoisinant la base de la cheminée, afin que le chauffeur puisse s'assurer de la manière dont le sable arrive, le pousser en avant, s'il y a lieu, et faciliter le travail du ringard, lorsqu'on renouvelle la couche de matière étendue sur la sole du four. Cette ouverture est simplement fermée par une porte en tôle appliquée extérieurement à la maçonnerie.

Quant à celle qui donne passage au ringard, pour le fermer, nous nous servions d'abord de deux trappes en tôle et à coulisses, venant se rejoindre de façon à ne laisser libre que l'in-

tervalle strictement nécessaire pour le diamètre de la tige du ringard, $0^m,04$ environ ; mais, par la chaleur rayonnante du foyer, ces trappes se déformaient, se brûlaient et devenaient difficiles à manœuvrer. Nous les avons remplacées par le système de porte déjà connu pour les fours à chaux (§ 38), et dont l'expérience est venue confirmer tous les avantages, dans cette nouvelle application.

L'alimentation du foyer se fait par une ouverture latérale, distincte de la précédente, et munie comme elle d'une porte avec remplissage en maçonnerie.

Le plan du four, pris parallèlement à la sole, ressemble assez bien à la coupe verticale d'un four à chaux. L'inclinaison donnée à la sole même facilite la manœuvre du ringard, et rend plus direct le choc de la flamme. La voûte est à section transversale en anse de panier; sa hauteur sous clef décroît de $0^m,80$ à $0^m,50$, de manière à conserver en même temps toute garantie de stabilité, et une portion de courbure à peu près verticale vers les naissances, pour tenir lieu de pied-droit. Cette dernière précaution est indispensable, si l'on veut que le four s'échauffe bien uniformément ; elle est basée d'ailleurs sur ce qui se pratique généralement dans les fours de boulangerie.

La flamme transmettant encore une partie de sa chaleur au sable contenu dans le compartiment moyen de la cheminée, cette circonstance a permis de restreindre la longueur du four, de manière à ne pas rendre trop fatigant l'emploi d'un long ringard, et sans nuire beaucoup à l'effet utile du combustible.

La grille a $1^m,60$ de longueur sur $0^m,70$ de largeur. Plus longue, elle deviendrait difficile à bien charger; plus étroite, elle suffirait sans doute avec du bois de fagots; mais les copeaux et les menus bois de démolition qui nous servent habituellement laissent peu de vide pour le passage de l'air et donnent beaucoup de brasier : il fallait donc par cela même augmenter son étendue.

Enfin, la cheminée a $8^m,00$ de hauteur, $0^m,40$ en carré à l'orifice supérieur, mais $1^m,00$ de profondeur à la base ; et cela,

dans le but d'avoir une grande surface de contact entre les gaz chauds et le compartiment à sable.

De la marche de la combustion.

§ 72. Le sable et le combustible étant rendus à pied-d'œuvre, la conduite du four que nous venons de décrire exige deux hommes : le premier, qui veille exclusivement à l'entretien du feu, et à ce qui se passe à la base de la cheminée; le second, qui fait descendre le sable dans la cheminée, le répand sur la sole du four, le remue au moins une fois pendant la durée de la torréfaction, et le ramasse dans le puisard, au moment convenable. Ici on n'a pas à craindre les inconvénients de la chaleur rayonnante, comme dans les fours à chaux et à briques, car on est toujours à même de retirer le sable suffisamment torréfié, ou de le mettre en couche plus épaisse dans les parties les plus voisines du foyer. L'important est donc d'abord de bien charger la grille, afin qu'il ne s'échappe pas d'air échauffé en pure perte : pour cela, on peut sans crainte accumuler le combustible jusqu'à $0^m,15$ ou $0^m,20$ de hauteur; car la voûte du four, ne se trouvant en contact immédiat avec aucun corps refroidissant, devient assez incandescente pour maintenir les gaz de la distillation du bois à la température à laquelle ils s'enflamment. Aussi, c'est à peine si l'on aperçoit quelques indices de fumée sortir à un instant quelconque par le haut de la cheminée; et il nous paraît difficile de rencontrer un foyer plus fumivore.

C'est durant les premiers jours où le feu est allumé qu'on brûle la plus forte proportion de combustible. Cette proportion diminue ensuite peu à peu; et, dès le sixième jour, elle reste sensiblement constante. Voici d'ailleurs le tableau de la dépense de chaque jour observée pendant un mois. :

Jours.	Tombereaux.	Jours.	Tombereaux.	Jours.	Tombereaux.	Jours.	Tombereaux.
1er	9	5e	7	9e	7	13e	7
2e	9	6e	8	10e	7	14e	7
3e	9	7e	7	11e	8	15e	7
4e	8	8e	8	12e	7	16e	7

Jours.	Tombereaux.	Jours.	Tombereaux.	Jours.	Tombereaux.	Jours.	Tombereaux.
17e......	6	21e......	7	25e......	7	29e......	6
18e......	7	22e......	7	26e......	7	30e......	7
19e......	7	23e......	7	27e......	6		
20e......	7	24e......	7	28e......	6		

Chacun de ces tombereaux forme à peu près un stère; ils ne sont pas tous du même poids, à cause de l'état très-variable des copeaux et autres menus bois employés; mais, d'après diverses pesées que nous avons faites, on peut évaluer à $2,400^k$ la consommation moyenne par 24 heures; ce qui donne en définitive 100^k par heure.

En supposant l'air demi-brûlé, et les gaz refroidis jusqu'à 300°, à l'orifice supérieur de la cheminée, on voit que leur vitesse d'écoulement à cet orifice doit être d'environ

$$\frac{1,000^{mc}(1+300 \times 0.00375)}{3,600 \times 0,40 \times 0,40} = 3^m,69 \text{ par seconde.}$$ [1]

De la quantité de produits obtenus.

§ 73. Après que le sable a été répandu sur toute la sole, en zones ondulées, un peu plus épaisses sur le devant du four que sur le derrière et sur les côtés, on retire le ringard, et on ferme exactement l'ouverture qui lui donnait passage. On laisse le tout en cet état, pendant 20 à 25 minutes. Au bout de ce temps, on renouvelle les surfaces soumises au choc de la flamme. On attend de nouveau pendant 20 minutes environ; la matière est alors suffisamment torréfiée; on l'amasse dans le puisard, et on la remplace par d'autre immédiatement.

La quantité de pouzzolane préparée de cette manière varie suivant que le four est plus ou moins chaud; mais elle devient constante à partir du cinquième ou sixième jour, et s'élève régulièrement à $3^{mc},40$ par 24 heures. Le nombre des fournées

[1] Le numérateur exprime le volume des gaz chauds à 300°; le premier facteur du dénominateur indique le nombre de secondes contenues dans une heure; et les deux autres, la section de l'orifice de la cheminée.

dans ce même intervalle est de 34; ce qui donne pour chacune 100 litres de pouzzolane et 42 minutes de chauffage.

Dans les premiers temps où nous installâmes cette fabrication, on retirait jusqu'à 5^{mc} de produits par 24 heures. Mais l'expérience ne tarda pas à nous démontrer que la trop grande quantité nuisait à la qualité; et que, chose remarquable, cette même poudre était moins énergique que le sable cru. Il n'était pas moins important d'autre part de constater ce qui adviendrait, en prolongeant la torréfaction au-delà de 42 minutes. Nous fîmes pour cela deux essais nouveaux, l'un à 2 heures et l'autre à 3 heures de chauffage par fournée; et nous trouvâmes que, dans ces deux circonstances, l'énergie de la pouzzolane perd un peu, sous le rapport de la vitesse de prise, mais reste à peu près la même, sous le rapport de la résistance à la rupture au bout de quinze mois.

Il importait enfin d'avoir, pour terme de comparaison, quelques essais sur le gneiss torréfié à l'état de moellon, suivant la méthode usitée antérieurement. Pour cela, nous prîmes au hasard, dans un approvisionnement assez considérable, de la poudre provenant de moellon chauffé pendant 12 à 15 heures dans le four n° 3 (§ 31), et d'autre provenant de fragments cuits au-dessus de la pierre calcaire, dans un four à chaux. Avec la première, les résultats furent inférieurs à ceux du sable cru; avec la seconde, ils furent sensiblement meilleurs, mais plus faibles néanmoins que ceux du sable torréfié au four à réverbère.

Expériences comparatives sur la pouzzolane de gneiss prise à divers états.

§ 74. Les expériences que nous venons de mentionner sont réunies dans les deux tableaux suivants.

Première série d'expériences.

NUMÉROS.	COMPOSITION DES MORTIERS.	VITESSES de prise.	RÉSISTANCES à la rupture par centimètre carré.	ÂGE des mortiers au moment de la rupture.	OBSERVATIONS.
		Jours.			
1	1 de chaux en pâte avec 2 de sable cru.	20	1k,07	8 mois.	Immergés sous l'eau de mer. Le temps de prise est un peu incertain parce que la surface s'est boursouflée.
2	*Idem* avec 2 ½.	20	1 ,47	*Idem.*	
3	*Idem* avec 2 de sable légèrement torréfié.	35	0 ,92	*Idem.*	
4	*Idem* avec 1 de sable *idem* et 1 de sable quartzeux.	?	<0 ,35	*Idem.*	Les résistances à la rupture ont été calculées généralement d'après la formule de Galilée, $2 P c = R a b^2$, où P indique le poids qui a causé la rupture, c la distance du point d'encastrement du mortier au point d'application de la charge, a la largeur de l'échantillon, et b sa hauteur.
5	*Idem* avec 2 ½ de sable torréfié pendant 42 minutes.	7	2 ,44	*Idem.*	
6	*Idem* avec 2 de sable *idem*. . . .	7 ½	2 ,44	*Idem.*	
7	*Idem* avec 1 ½ de sable *idem*. . .	8	1 ,83	*Idem.*	
8	*Idem* avec 1 de sable *idem* et 1 de sable quartzeux.	20	<0 ,45	*Idem.*	
9	*Idem* avec 2 de moellon pulvérisé après avoir été chauffé pendant 12 à 15 heures dans le four nº 3.	34	0 ,96	*Idem.*	
10	*Idem* avec 1 ½ de la même pouzzolane.	?	<0 ,44	*Idem.*	Tous les mortiers compris dans ce tableau ont été immergés immédiatement sous de l'eau de mer.
11	*Idem* avec 1 *idem* et 1 de sable quartzeux.	?	<0 ,34	*Idem.*	
12	*Idem* avec 2 de poudre de moellon chauffé plus fortement que le précédent. . . .	8	1 ,56	*Idem.*	
13	*Idem* avec 2 *idem* provenant d'un autre échantillon.	7	2 ,13	*Idem.*	

Deuxième série d'expériences.

NUMÉROS.	COMPOSITION DES MORTIERS.	VITESSES de prise.	RÉSISTANCES à la rupture par centimètre carré.	ÂGE des mortiers au moment de la rupture.	OBSERVATIONS.
		Jours.			
14	1 de chaux en pâte avec 2 de sable torréfié pendant 42 minutes..................	8	2k,36	15 mois	Gâchés fermes, et immergés immédiatement sous de l'eau douce.
15	*Idem* avec 2 de sable torréfié pendant 2 heures........	12	2 ,59	*Idem.*	
16	*Idem* avec 2 de sable torréfié pendant 3 heures.........	20	2 ,62	*Idem.*	
17	Comme le nº 14, mais gâché très-mou, et immergé immédiatement sous de l'eau douce	24	1 ,38	*Idem.*	Il est remarquable que sous l'eau douce les mortiers n'ont plus la même tendance à se boursoufler à la surface comme sous l'eau de mer.
18	Comme le nº 15, mais un peu moins mou que le nº 17....	16	1 ,80	*Idem.*	
19	Comme le nº 16, et à peu près de la même consistance que le nº 18................	20	2 ,14	*Idem.*	
20	Comme le nº 14, mais ressuyé pendant 18 heures avant l'immersion.............	12	3 ,00	*Idem.*	
21	Comme le nº 15, et avec la même précaution que le nº 20.................	11	3 ,26	*Idem.*	
22	Comme le nº 16, et avec la même précaution que les nos 20 et 21.............	13	3 ,00	*Idem.*	

De l'influence des parties inertes dans le sable de gneiss.

§ 75. Les échantillons nos 4, 8 et 11 indiquent que la pouzzolane de gneiss ne supporte aucune addition de sable

quartzeux ; tous les autres numéros indiquent que, torréfiée à point, elle donne des mortiers qui font prise assez rapidement sous l'eau de mer ou sous l'eau douce, mais qui n'acquièrent par la suite qu'une dureté moyenne. En définitive, elle ne peut être rangée que dans la catégorie des pouzzolanes *simplement énergiques.*

Ces résultats nous paraissent tenir à une seule et même cause, à la présence des parties inertes. On sait en effet que le gneiss est, comme le granit, formé de quartz grenu, de mica et de feldspath : or le quartz résiste totalement à la décomposition spontanée; le mica y résiste au moins en partie, car c'est lui qui parsème le sable de carrière d'une multitude de paillettes miroitantes; le feldspath seul subit une altération chimique, et peut fournir l'élément actif de la pouzzolane. L'énergie de cette pouzzolane dépend donc des quantités relatives de feldspath d'une part, et de quartz ou de mica d'autre part. Divers essais de triage nous ont donné, pour le quartz, une proportion moyenne d'un quart. Le mica est beaucoup plus abondant, mais difficile à isoler. Toutefois en recueillant, au moyen d'un tamis très-fin, les portions les plus pulvérulentes d'un sable bien torréfié, elles ont paru extrêmement chargées en mica; et, en les gâchant avec de la chaux en pâte, elles ont donné un mortier qui n'a fait prise sous l'eau qu'au bout de 24 jours; tandis qu'avec du même sable non tamisé, la prise du mortier a eu lieu au bout du septième jour.

Nous ajouterons enfin que la proportion des composants peut varier, soit d'une carrière à l'autre, soit dans les différentes veines d'une même carrière. C'est ainsi, probablement, qu'à une certaine époque du sable torréfié, pris au hasard dans le magasin, nous donna :

Vitesse de prise, 5 jours ; résistanee à la rupture par centimètre carré, $5^k,10$; âge du mortier au moment de l'épreuve, 5 mois 1/2.

L'énergie des produits obtenus dans le four à réverbère paraît donc dépendre tout autant de la matière qu'on emploie que du degré de torréfaction qu'on lui fait subir.

Essai du même four à réverbère, pour la torréfaction des argiles plastiques.

§ 76. Ce que nous avons dit jusqu'à présent du sable de gneiss doit s'appliquer en grande partie, nous ne saurions en douter, aux sables de grauwacke et aux arènes; mais les circonstances ne nous ont point permis de le vérifier.

Les argiles plastiques ont sur ces débris de roches feldspathiques l'avantage de ne pas être mêlées de corps essentiellement inertes; sous ce rapport, elles offrent plus de chances de se convertir en pouzzolanes très-énergiques. Mais peuvent-elles être traitées avec succès dans le même four à réverbère? C'est une question que nous avons voulu éclaircir par quelques essais dont il va être rendu compte.

Nous nous sommes servi d'argile commune de Brest, ocreuse et éminemment plastique. Après l'avoir découpée en petites tranches, au moyen d'un fil de fer, et après avoir fait sécher ces petites tranches à l'air libre, on les a réduites en poudre, ou pour mieux dire, on les a grenées avec un appareil dont la description est inutile en ce moment, mais qui du reste est fondé sur le même principe que les *moulins à café*. L'argile amenée à ce point a été introduite dans le four, comme le sable de gneiss, et chauffée avec la même espèce de combustible, d'abord pendant 42 minutes, puis pendant 2 heures, puis enfin pendant 3 heures. On a eu ainsi trois espèces de pouzzolanes qui, employées à la fabrication des mortiers, ont donné :

La 1re, prise imparfaite, tendance à faire pâte avec l'eau;

La 2e, vitesse de prise 20 jours, résistance à la rupture après 15 mois, 1^{k},44;

La 3e, vitesse de prise 11 jours, résistance à la rupture après 15 mois, 3^{k},12.

En même temps nous avons trouvé :

Avec pouzzolane de carreau bien cuit, vitesse de prise 7 jours, résistance à la rupture après 8 mois 6^{k},50;

Avec pouzzolane d'Italie, vitesse de prise 7 jours, résistance à la rupture après 8 mois 7^{k},43.

On voit d'après cela que le degré de chaleur produit dans notre four à réverbère est insuffisant pour donner aux argiles plastiques toute l'énergie dont elles sont susceptibles. Il n'en serait plus de même sans doute, si l'on prenait un combustible meilleur; mais il n'en reste pas moins prouvé que, sous le rapport de la torréfaction, on ne saurait mettre sur la même ligne le sable de gneiss et les argiles plastiques. Pour ces dernières d'ailleurs, une considération frappe dès l'abord, c'est que, si le chauffage n'est pas parfaitement uniforme, toutes les parties qui conservent de la tendance à faire pâte avec l'eau deviennent un obstacle à la prise des mortiers, et une cause permanente d'altération. Le sable de gneiss, au contraire, agit déjà comme pouzzolane, même à l'état naturel; et ne donne, dans le cas le plus défavorable, qu'un mélange de parties plus ou moins actives.

De la torréfaction en petit sur des plaques en tôle.

§ 77. Les résultats que nous venons d'exposer ne concordent pas beaucoup avec la manière dont a été envisagée la préparation des pouzzolanes factices, à l'aide de matières pulvérulentes chauffées sur des plaques en tôle. *Une cuisson très-modérée, une incandescence de quelques minutes,* comparées à ce qu'exige en grand la calcination de la chaux ou même la cuisson de la brique, semblent entraîner avec elles l'idée d'un degré de chaleur facile à atteindre, et par suite la nécessité d'une influence particulière due au contact de l'air atmosphérique. Il ne sera donc pas sans intérêt de rectifier cette opinion par de nouvelles expériences, qui nous conduiront du reste à quelques autres remarques.

En exposant les plaques en tôle à un feu de cheminée ordinaire, le degré d'incandescence que l'on obtient est trop faible; car de l'argile en poudre, torréfiée de cette manière pendant 10, 20, 30, 45 et 60 minutes, ne nous a donné que des pouzzolanes faisant encore pâte avec l'eau, sauf la dernière qui a été passable. Dans les mêmes circonstances, de la pierre cal-

caire réduite en poudre n'a pas perdu au-delà de 6 à 8 centièmes de son poids. En conséquence, pour avoir une chaleur plus vive, et opérer avec plus de promptitude, nous avons établi les plaques en tôle dans une petite forge, sur un feu de charbon de bois; nous avons alors trouvé, pour 100 grammes de poudre de pierre à chaux hydraulique, contenant 33 centièmes d'acide carbonique :

Durées de torréfaction.....10 min. 15 *id.* 20 *id.* 45 *id.*
Pertes de poids correspondante 8g,33; 30g,00; 32g,85; 33g,00.

Les trois derniers échantillons, arrosés avec de l'eau, ont fusé et foisonné comme la chaux ordinaire sortant du four. Ainsi donc, en quelques minutes, on reproduit sur des plaques en tôle le même effet que dans un four après plusieurs jours de chauffage.

Pour savoir ensuite ce qu'il advient, en remplaçant la poudre calcaire par de la poudre argileuse, nous avons fait deux séries d'expériences, l'une sur le sable de gneiss, et l'autre sur l'argile ocreuse; nous avons confectionné des mortiers avec les pouzzolanes résultantes; et nous en avons déduit les deux tableaux suivants.

Sable de gneiss.

Durées de torréfaction........	0′	3′ ½	5′	7′ ½	10′	15′	20′	40′	60′	120′	*N. B.* Il n'a pas toujours été possible d'apprécier exactement les pertes de poids à cause de l'adhérence du sable contre les plaques en tôle.
Pertes de poids sur 100 grammes...	//	gr. 6,20	gr. 6,30	?	gr. 7,30	?	gr. 7,15	?	?	?	
Ordre dans lequel a eu lieu la vitesse de prise des mortiers.......	4	3	1	1	1	2	3	4	5	5	Les duretés ont été mesurées par les poids nécessaires pour faire pénétrer une tige en fil de fer, de 0m,0012 de diamètre.
Duretés pour *idem* après deux mois.	Ramolli et sans consistance.	gr. 400	gr. 800	gr. 800	gr. 800	gr. 800	gr. 500	gr. 300	gr. 250	gr. 180	

Argile ocreuse pulvérulente.

Durées de torréfaction........	5′	7′	10′	15′	20′	25′	30′	40′	60′	120′	*N. B.* Les deux premiers échantillons ont été chauffés plus vivement que de coutume.
Pertes de poids sur 100 grammes...	?	?	gr. 9,50	gr. 9,65	gr. 11,60	?	gr. 12,20	gr. 12,50	?	?	L'argile a adhéré contre les plaques en tôle.
Ordre dans lequel a eu lieu la vitesse de prise des mortiers..........	4	3	3	2	1	1	2	4	5	6	Toutes les pouzzolanes mentionnées dans ces deux tableaux étaient d'un rouge très-prononcé, sauf la
Duretés pour *idem* après deux mois.	gr. 900	gr. 1000	gr. 1000	gr. 1100	gr. 1500	gr. 1500	gr. 1200	gr. 600	gr. 500	gr. 200	première qui avait la couleur naturelle du sable.

En résumé, ces tableaux font voir que le degré de chaleur nécessaire pour convertir l'argile ocreuse en bonne pouzzolane diffère peu de celui qui convient pour la calcination complète de la chaux, et, par conséquent, peut être assimilé à celui qui convient pour la cuisson de la bonne brique; que pour le sable de gneiss, ainsi que nous l'avions déjà démontré, il suffit d'une intensité de torréfaction beaucoup moindre, et qui, en grand, ne doit pas correspondre au delà du terme de la brique peu cuite. Rien jusqu'à présent ne fait donc sentir l'utilité de cette hypothèse, que le contact de l'air exerce une influence particulière dans la torréfaction des substances argileuses quelconques, sur des plaques en tôle. On objecte, il est vrai, que les mêmes substances torréfiées en vase clos ne donnent pas les mêmes résultats ; mais il n'y a là rien qui doive surprendre, et nous allons essayer de le prouver.

De la torréfaction en vase clos.

§ 78. Nous avons opéré dans un fourneau de fusion, avec des creusets d'environ 4 litres de capacité; seulement, au lieu de quatre heures de feu que ce fourneau exige pour fondre le cuivre, nous nous sommes borné à deux heures. Un premier

creuset plein de sable de gneiss contenait en outre plusieurs menus fragments de pierre à chaux hydraulique, pesant de 15 à 17 grammes chacun, et disposés de telle sorte qu'on pût reconnaître, après coup et comme à l'aide d'un pyromètre, les intensités relatives de chaleur produite dans les divers points de la masse. Voici alors ce qui est arrivé :

1° Dans les parties hautes et centrales du creuset, le sable de gneiss n'a changé ni de couleur, ni de consistance; et les fragments calcaires n'ont perdu que de cinq à six centièmes de leur poids.

2° Dans la couche enveloppante, le sable s'est agglutiné légèrement, a pris une couleur gris-ardoise pâle; et les fragments calcaires, un peu mieux calcinés que les précédents, ont donné une pellicule de chaux qui a fusé au contact de l'air.

3° Dans la couche plus extérieure encore, le sable a pris la consistance des scories de forge, et la couleur ardoise bien prononcée. Les fragments calcaires y ont été trouvés à l'état de chaux parfaite, mais sans indice de surcalcination, ni d'adhérence avec la matière qui leur servait de géode.

Un second creuset rempli d'argile ocreuse, en poudre fortement desséchée et déjà rouge, a donné des produits tout à fait analogues, c'est-à-dire de trois espèces distinctes : l'un de couleur rouge ordinaire, l'autre de couleur pourpre foncé, et le troisième de couleur ardoise.

Dans la transition de l'un à l'autre de ces produits principaux, il existe nécessairement une foule de nuances, difficiles à isoler sans doute, mais qui ne correspondent pas moins à autant de degrés particuliers de torréfaction. En résumé, on peut donc conclure :

1° Qu'il est à peu près impossible d'obtenir, en vase clos, une torréfaction homogène;

2° Que, si les substances employées sont ocreuses, leur fusibilité se manifeste à un degré de chaleur moindre que celui qui est nécessaire pour la calcination de la chaux; ce qui n'a pas lieu au contact de l'air, sur des plaques en tôle.

3° Que par suite, dans ces deux modes de préparation des pouzzolanes, les mêmes degrés de chaleur ne correspondent pas aux mêmes réactions chimiques.

4° Que dès lors, n'ayant plus pour se guider, dans le choix des termes de comparaison, que l'apparence des matières, on peut à la meilleure pouzzolane préparée au contact de l'air en opposer une autre préparée en vase clos, et dans laquelle la réaction chimique des éléments est aussi avancée qu'elle le serait, par exemple, après deux ou trois heures de torréfaction sur une plaque en tôle, l'argile étant d'ailleurs ocreuse ou simplement composée de silice et d'alumine.

Ainsi donc, comme on l'a déjà vu précédemment, il peut arriver que deux mortiers faits avec des pouzzolanes différentes acquièrent au bout d'un certain temps la même dureté, sans avoir eu cependant la même vitesse de prise. Ainsi on peut dire encore que la proportion variable d'alumine soluble dans l'acide hydrochlorique n'est pas une conséquence de tel ou tel mode de torréfaction, mais bien de la difficulté de saisir des termes de comparaison parfaitement exacts.

Du décroissement d'énergie des pouzzolanes, à mesure qu'on approche du terme de la vitrification.

§ 79. Des phénomènes qui seront développés dans le chapitre suivant nous ont fait sentir l'importance de constater si le décroissement d'énergie des pouzzolanes était continu, à mesure que ces matières approchent du terme de la vitrification. Dans ce but, nous avons recueilli les pouzzolanes précédentes, préparées en vase clos, et portant déjà des traces plus ou moins évidentes de vitrification. Avec ces pouzzolanes nous avons confectionné des mortiers, et nous avons remarqué tout d'abord qu'une très-petite addition d'eau suffisait pour les ramollir singulièrement. Quoi qu'il en soit, les échantillons obtenus en pâte bien ferme ont été immergés le jour même; mais les autres ne l'ont été que le lendemain, afin de leur donner le temps de se ressuyer. Au bout de quinze jours, ni les uns ni

les autres n'avaient encore acquis aucune espèce de consistance; et ils n'annonçaient qu'une matière inerte. Avec le temps, ces résultats peuvent changer sans doute, mais ils n'en resteront pas moins bien inférieurs à ceux du § 77 [1].

Si, au lieu de substances contenant de l'oxide de fer, on en avait employé contenant de la chaux, de la potasse ou de la soude, tout fait présumer qu'il en eût été de même; car les corps que nous venons de citer font également l'office de fondants par rapport à la silice. Ainsi donc, de quelque manière que l'on explique la solidification des mortiers, il faut admettre en fait que les pouzzolanes ont besoin et d'être privées d'eau par la chaleur, et de ne pas prendre une trop grande cohésion. D'où il résulte que le degré le plus convenable de torréfaction ne peut être le même pour toutes les pouzzolanes, mais doit varier en plus ou en moins, suivant que la matière employée contient plus ou moins d'eau et un fondant plus ou moins énergique.

Du rapport entre la qualité des pouzzolanes et quelques-unes de leurs propriétés physiques.

§ 80. En indiquant les conditions nécessaires pour obtenir de bonnes pouzzolanes, M. Vicat dit (*Résumé sur les mortiers*, page 33) que la matière doit atteindre le minimum de pesanteur spécifique, et le maximum de faculté absorbante. S'il en était rigoureusement ainsi, ce serait un argument contraire à l'hypothèse d'une *réaction chimique* dans la solidification des mortiers à pouzzolanes. Nous avons cru intéressant de le vérifier; et pour cela nous avons fait diverses expériences, dont voici le résumé.

[1] Au bout d'un mois, ces mêmes mortiers ne s'étaient pas améliorés d'une manière sensible. Les échantillons faits avec les pouzzolanes les plus surcalcinées étaient aussi mous que le premier jour.

SABLE DE GNEISS à divers états DE TORRÉFACTION.	POIDS DE MATIÈRE soumise à l'expérience.	POIDS DE MATIÈRE après 18 jours d'exposition en lieu sec.	POIDS DE MATIÈRE après 3 jours d'exposition en lieu humide.	POIDS DE MATIÈRE après 7 jours d'exposition en lieu humide.	ACCROISSEMENT de poids maximum pour 100 parties de matière.
	gr.	gr.	gr.	gr.	
Sable cru fortement desséché..	41,90	42,00	42,30	42,30	0,95
Torréfié pendant 3 minut. 1/2.	35,75	35,83	36,05	36,05	0,84
Idem 5 minutes............	35,50	35,60	35,80	35,80	0,84
Idem 7 minutes 1/2........	36,00	36,10	36,30	36,29	0,83
Idem 10 minutes...........	34,50	34,60	34,75	34,75	0,72
Idem 15 minutes...........	33,75	33,86	34,05	34,04	0,80
Idem 20 minutes...........	34,70	34,80	34,95	34,95	0,75
Idem 40 minutes...........	32,45	32,54	32,67	32,65	0,61
Idem 60 minutes...........	32,30	32,39	32,52	32,50	0,68
Idem 120 minutes..........	30,35	30,44	30,55	30,55	0,66
Chauffé en vase clos un peu fritt.	55,00	//	55,20	55,15	0,36
Idem plus fortement fritté....	51,70	//	51,80	51,75	0,20
Idem plus fortement encore..	49,90	//	50,00	50,00	0,20

ARGILE OCREUSE à divers états DE TORRÉFACTION.	POIDS DE MATIÈRE soumise à l'expérience.	POIDS DE MATIÈRE après 18 jours d'exposition en lieu sec.	POIDS DE MATIÈRE après 3 jours d'exposition en lieu humide.	IDEM après 7 jours d'exposition.	IDEM après 9 jours d'exposition.	ACCROISSEMENT de poids maximum pour 100 parties de matière.
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	
Torréfiée pendant 5 minut...	26,55	26,59	26,85	26,95	26,94	1,50
Idem 7 minutes...........	27,00	27,17	27,45	27,54	27,54	2,00
Idem 10 minutes..........	32,45	32,49	32,90	33,05	33,04	1,85
Idem 15 minutes..........	32,15	32,20	32,65	32,74	32,72	1,77
Idem 20 minutes..........	29,20	29,22	29,58	29,63	29,65	1,52
Idem 25 minutes..........	31,70	31,75	32,03	32,12	32,15	1,40
Idem 30 minutes..........	29,65	29,70	29,95	30,03	30,05	1,33
Idem 40 minutes..........	29,25	29,26	29,50	29,57	29,57	1,08
Idem 60 minutes..........	36,70	36,74	37,05	37,20	37,20	1,36
Idem 120 minutes.........	19,00	19,04	19,20	19,25	19,25	1,31
Chauf. en vase clos un peu frittée	54,65	//	54,74	54,80	54,76	0,27
Idem plus fortement.......	55,40	//	55,53	55,60	55,50	0,36

Ces deux tableaux font voir, 1° que les pouzzolanes exposées en lieu sec ont un pouvoir absorbant extrêmement faible; 2° que ce pouvoir absorbant augmente d'une manière très-sensible en lieu humide, circonstance qui rend peu probable la condensation des gaz admise par quelques personnes; 3° que ce même pouvoir est à son maximum, avant que le sable de gneiss ou l'argile aient acquis le degré le plus convenable de torréfaction; 4° qu'il n'est pas égal à beaucoup près, dans ces deux espèces de pouzzolanes, et que sous ce rapport il donne une idée assez exacte des énergies comparatives; 5° enfin, que la vapeur d'eau ainsi condensée n'entre pas en combinaison avec la matière fixe, car elle s'échappe déjà, en très-petite quantité, il est vrai, par une simple variation d'hygrométrie atmosphérique.

Des expériences qui seront détaillées dans le VIIIe chapitre feront voir également qu'en prenant des briques à divers états de cuisson, et les immergeant dans l'eau, la proportion de liquide absorbée est plus grande pour les briques peu cuites que pour les briques bien cuites, c'est-à-dire plus grande pour les briques qui donnent de médiocre pouzzolane que pour celles qui en donnent de bonne. Les mêmes expériences feront voir encore que l'argile sèche, avant d'atteindre le terme de bonne cuisson, augmente de volume, en passant par le terme de demi-cuisson; et que, dans ce dernier état, la densité de la brique est moindre que dans le précédent. Ainsi donc le maximum d'énergie de pouzzolanes ne correspond ni à leur minimum de densité, ni à leur maximum de faculté absorbante.

CHAPITRE VI.

DE LA PRÉPARATION, DE LA CONSERVATION ET DE L'EMPLOI DES PLÂTRES-CIMENTS.

Des calcaires qui servent à la préparation des plâtres-ciments.

§ 81. Quand une pierre calcaire contient environ 20 centièmes de son poids d'argile, ou au-delà, elle peut fournir la

substance connue sous les noms de *plâtre-ciment*, *ciment Parker*, *ciment romain*, etc. Cette substance a la propriété de durcir très-vite, comme le plâtre, mais de plus de durcir sous l'eau, comme les chaux hydrauliques. Elle présente des caractères tellement particuliers dans sa préparation et dans son emploi; elle acquiert d'ailleurs un si haut intérêt en France, depuis la création de l'établissement de Pouilly, que nous avons cru devoir y consacrer un chapitre spécial, afin de mieux insister sur plusieurs observations dont on sentira facilement l'importance.

Jusqu'à ces dernières années, le plâtre-ciment était une production tout anglaise. C'est principalement sur les bords de la Tamise qu'on trouvait le calcaire propre à sa fabrication. En 1802, on découvrit du calcaire semblable sur la plage de Boulogne, mais en galets roulés, et en trop faible abondance pour devenir l'objet d'une exploitation régulière. Il en existe également à Baye près de Nevers, suivant M. Vicat; en Russie, suivant MM. Lamé et Clapeyron, et en beaucoup d'autres localités sans doute; mais jusqu'à présent les recherches de M. Lacordaire, à Pouilly, sont les seules qui aient produit, en France, des résultats bien positifs, et sur une grande échelle.

La pierre à ciment anglais appartient aux étages supérieurs des terrains secondaires, formation du lyas. Elle s'y présente ordinairement en rognons, au milieu des couches marneuses. Celle de Pouilly appartient aussi à la même formation géologique : une pareille coïncidence porte à conclure que cette nature de terrain est la plus favorable aux investigations nouvelles que l'on voudra tenter. Quoi qu'il en soit, voici les analyses qu'on a données des plâtres-ciments déjà connus:

Ciment anglais, abstraction faite de l'acide carbonique...............	55,4 de chaux	44,6 d'argile.
Ciment de galet de Boulogne.........	54,0	46,0
Ciment de Pouilly, 1re variété.......	42,86	57,14
Idem............2e variété.......	36,37	63,63
Ciment russe......................	62,00	38,00
Ciment de Baye..................	21,62	78,38

Du mode de préparation suivi par Parker.

§ 82. C'est en 1796 que Parker indiqua le premier un moyen de convertir en ciment ces calcaires très-argileux qu'il appelait *rognons d'argile*. Son procédé consistait essentiellement à pousser la calcination de la pierre jusqu'à *vitrification;* et il avait pris à ce sujet une patente dans laquelle on lit les détails suivants :

« Les pierres ou rognons d'argile sont d'abord brisés en petits « fragments; de là cuits dans un four, comme on le fait commu- « nément pour la chaux, avec une chaleur suffisante pour les « vitrifier, ensuite réduits en poudre par une opération méca- « nique ou toute autre. La poudre ainsi obtenue est la base du « ciment. Pour composer ce ciment de la manière la plus avan- « tageuse, on mêle deux parties d'eau à cinq parties de poudre, « on agite et bat le tout pour opérer le mélange. Le ciment « ainsi fait doit se rasseoir ou durcir en 10 ou 20 minutes, « soit dans l'eau, soit à l'air. (Extrait d'un rapport de M. Mallet « à la société d'encouragement.)

Parker n'ayant pas réussi dans son entreprise, et son procédé ayant été abandonné, on en a conclu généralement qu'il s'était trompé; et en cela on s'est appuyé sur ce qui arrive aux chaux communes surcalcinées. Mais ici l'analogie est en défaut; nous le montrerons bientôt par expérience.

Du mode de préparation suivi par les successeurs de Parker.

§ 83. Le plâtre-ciment qu'on livre aujourd'hui dans le commerce ne peut être désigné sous le nom de *ciment Parker,* car il y a une différence capitale dans le mode de préparation. Nous ignorons si les premiers successeurs de Parker ont donné une description de leur procédé; mais par la fin il est facile de juger des moyens. Leur ciment, en effet, traité par l'acide hydrochlorique, laisse dégager une quantité notable d'acide carbonique gazeux. Il a d'ailleurs une couleur ocreuse, ressemblant à celle de la pierre naturelle, et différant au contraire

beaucoup de celle qu'on peut lui donner par la vitrification. Nul doute alors que ce ciment ne soit formé avec les rognons d'argile *incomplétement calcinés.*

Quant à la méthode suivie par M. Lacordaire, M. Mallet dit, à la page 12 de son rapport déjà cité :

« La pierre s'exploite au fleuret et à la poudre, par des puits « et galeries, à une profondeur moyenne de 80 mètres . . . . . « on fait au dehors le triage et le cassage de cette pierre en « morceaux de la grosseur du poing, et on les porte au four, « qui est de l'espèce de ceux dits *fours coulants* ou *à feu con-* « *tinu.* La pierre cuite ou amenée à l'état de chaux est « ensuite broyée sous une paire de meules en fonte du poids « de 2,400^{k}. . . . . .ce ciment est ensuite passé dans des « claies formées de fils de fer espacés entre eux d'un millimètre « et demi; et l'on obtient de cette première opération l'espèce « de ciment dite *n° 2.* Celui-ci est passé dans une machine à « bluter formée aussi de fils de fer, mais moins espacés entre eux; « et il en sort l'espèce n° 1. »

M. Mallet ne dit nulle part si le calcaire est imparfaitement calciné; mais ce serait une erreur de penser qu'il en soit autrement. Il est d'ailleurs facile de le constater; car ce ciment, essayé par les acides, laisse, comme le ciment anglais, échapper une quantité notable d'acide carbonique.

De ce qui arrive aux plâtres-ciments, au terme de calcination complète.

§ 84. On voit en résumé qu'il est également possible d'obtenir des plâtres-ciments par surcalcination, ou par calcination incomplète[1]. Mais, chose digne de remarque, c'est qu'au terme

[1] L'existence simultanée de ces deux moyens de préparer les plâtres-ciments, et l'oubli dans lequel était resté celui de Parker, ont occasionné plus d'une méprise. Voici, par exemple, ce que dit M. Hassenfratz, dans son traité des mortiers (page 195) : « La calcination de cette pierre (galet de « Boulogne) est la même que celle de la chaux ordinaire; si elle est trop « échauffée, elle se vitrifie et n'est plus propre à faire du ciment. » Et plus loin (page 197) il ajoute : « On fait calciner dans des fours coniques à feu « continu, avec de la houille, les pierres calcaires avec lesquelles on fait

de *calcination complète*, non-seulement la pierre ne fuse point par extinction, mais encore, si on la triture comme le ciment ordinaire, elle ne donne qu'une poudre à peu près inerte. Tout se présente donc ici au rebours des chaux communes; et il est impossible de confondre une matière avec l'autre.

Cet instant d'inertie des plâtres-ciments, entre les termes de calcination incomplète et de surcalcination, nous semble un fait capital pour leur étude. Il explique déjà pourquoi un calcaire convenable peut échapper aux investigations, et être rebuté comme impropre, par une simple faute de calcination qui n'en est pas une pour tous les calcaires à chaux grasses ou hydrauliques. Dans cette catégorie, nous pouvons citer les essais de M. Treussart sur le galet de Boulogne. Il calcinait la pierre dans un four d'Alsace, au milieu de la chaux commune; aussi fut-il conduit à des anomalies que maintenant on comprendra sans peine. Par exemple, nous extrayons de son ouvrage (page 45, tableau n° 8) les résultats suivants :

MATIÈRES EMPLOYÉES.	VITESSES de prise.	POIDS supportés après un an.	OBSERVATIONS.
Galets de Boulogne seuls, cuits à l'ordinaire......	1/2 jour.	49^k	Ces nombres de kilogrammes expriment la résistance à la rupture pour des échantillons ayant $0^m,10$ de longueur entre deux points d'appui, $0^m,05$ en carré pour dimensions transversales, et recevant la charge au milieu de l'intervalle des points d'appui.
Idem avec 1/2 de sable....	20 jours.	17	
Idem avec 1 de sable.....	N'a pu être observée à cause de son extrême lenteur.	10	
Idem avec 2 de sable.....	*Idem.*	< 10	
Idem avec 2 de trass.....	*Idem.*	12	
Galets fortement calcinés..	12 jours.	130	

M. Vicat, opérant sans doute la calcination de la même

« à Londres le ciment romain ; mais la conduite du feu exige beaucoup d'at-« tention, parce que lorsque la chaleur n'est pas convenablement ménagée, le « ciment éprouve un commencement de fusion et n'est plus propre à aucun « usage. » Cependant il avait dit (page 126) que le galet de Boulogne calciné longuement et fortement donne une chaux qui se durcit facilement, et que ce durcissement devient alors égal à celui de la pierre, au moins; mais lorsqu'il n'est calciné qu'au degré de la chaux ordinaire, le ciment ne durcit plus avec la même facilité, ni aussi fortement.

manière, a trouvé que le ciment de Baye ne faisait prise qu'après trois jours d'immersion. Ce temps serait peu de chose pour une chaux hydraulique, mais il est énorme pour un plâtre-ciment. Cependant, d'après la composition du calcaire de Baye, nous ne pouvons hésiter à le ranger dans cette dernière classe. La proportion d'argile y est même telle que nous pensons qu'elle contient une quantité notable de silice en grains; sans quoi, ce calcaire ne renfermerait pas plus de chaux que les mélanges artificiels de M. Bruyère, et ne pourrait donner, comme eux, que de la pouzzolane et non un plâtre-ciment.

Expériences sur la pierre et le ciment anglais.

§ 85. Détaillons maintenant les expériences qui nous ont conduit à reconnaître ces alternatives de bonne et mauvaise qualité dans les plâtres-ciments; et commençons par ce qui concerne la pierre et le ciment anglais.

1° La pierre anglaise que nous avions à notre disposition était d'une couleur jaunâtre et d'une texture très-compacte. Après l'avoir cassée en petits fragments et placée dans un creuset, nous l'avons fait chauffer, dans un fourneau de laboratoire muni de son dôme, jusqu'à dégagement complet de l'acide carbonique des fragments d'épreuve pris à la partie supérieure du creuset. Mais, en raison de l'inégalité de chauffage dans le sens de la hauteur, un grand nombre de fragments se sont trouvés agglutinés les uns aux autres, frittés et noircis. Ils ont été séparés avec soin, et ont donné par la trituration une poudre d'un gris noirâtre. Ne connaissant pas à cette époque les travaux de Parker, nous pensions que tout calcaire surcalciné n'était plus bon à rien; et c'était seulement dans l'intention d'en acquérir une preuve directe, que nous gâchâmes avec de l'eau cette espèce de poudre. Au bout de quelques instants, nous trouvâmes avec surprise un premier échantillon durci. Un second, préparé de même et immergé sous l'eau, fit voir effectivement que la prise était complète en moins de 15 minutes.

Tout le calcaire contenu dans le haut du creuset n'avait

pas changé sensiblement de couleur ; broyé et tamisé, il donna une poudre d'un jaune terreux ; nous en fîmes un mortier de forte consistance argileuse, et nous l'immergeâmes de suite sans enveloppe. Il ne se déforma point sous l'eau, mais 20 jours après il était resté dans le même état, c'est-à-dire comme une substance totalement inerte. Une petite portion du même mortier, exposée à l'air au moment de sa confection, y avait cependant fait prise en une heure 25 minutes, et 50 jours après elle avait acquis une grande dureté.

Une autre portion de cette même poudre jaune fut mêlée avec un égal volume de chaux commune, pour essayer si elle n'agirait pas comme pouzzolane. Ce nouveau mortier, examiné pendant 15 jours consécutifs, se comporta comme le ciment pur, mais au bout d'un mois il avait fait prise.

2° Le ciment anglais sur lequel nous avons fait des expériences provenait de l'approvisionnement de la direction des travaux maritimes fait en juillet 1824, c'est-à-dire depuis cinq ans et demi. Il était avarié ; mais nous expliquerons plus tard comment il suffit d'une assez faible chaleur pour lui rendre beaucoup d'énergie, et déterminer sa prise complète en 14 minutes. Cela posé, nous avons rempli de ce ciment un creuset et nous l'avons fait chauffer : l'inégale répartition de la chaleur nous a permis de séparer le produit en trois portions d'apparence bien distincte.

La première partie, traitée par l'acide hydrochlorique, ne laissait plus échapper de gaz ; un changement visible de couleur et une légère agglomération attestaient même qu'elle avait subi un commencement de surcalcination. Nous en avons fait un mortier qui a été immergé de suite : sa prise n'a été complète qu'au bout de 6 heures 1/2.

La portion suivante avait un commencement de surcalcination plus manifeste ; elle aurait même dû être triturée et tamisée de nouveau, et, cette opération n'ayant pas eu lieu, nous croyons qu'il en est résulté une diminution d'énergie. Quoi qu'il en soit, après son immersion, les arêtes

du mortier se sont affaissées, mais sa prise a été complète en 3 heures 40 minutes.

Enfin la troisième portion, qui provenait du fond du creuset, était frittée et scorifiée; elle a donné par trituration une poudre d'un bleu ardoise. On en a gâché et mmergé dans un verre pour premier essai; la prise a paru bonne en 33 minutes. Un second échantillon plus fort a été immergé sans entourage : ses arêtes ne se sont nullement déformées, et au bout de 48 minutes il avait fait très-bonne prise.

Expériences semblables sur le ciment de Pouilly.

§ 86. N'ayant pas de pierre de Pouilly à notre disposition, nous n'avons pu opérer comme tout à l'heure; mais cette circonstance nous a semblé peu regrettable, parce que la poudre de ciment dont nous nous sommes servi retenait encore beaucoup d'acide carbonique, et pouvait ainsi faire reconnaître également les effets de la complète calcination et de la surcalcination.

Le ciment de Pouilly, ravivé par une nouvelle torréfaction de quelques instants comme le ciment anglais, fait prise à l'air en 5 minutes. Cela posé, un premier creuset rempli de ciment déjà altéré a été chauffé à une chaleur peu intense : le ciment pris au haut du creuset n'a point perdu de son acide carbonique, et a fait prise à l'eau en 8 minutes et demie; le reste a été partagé en deux échantillons qui ont fait prise à l'air, l'un en 11 minutes et l'autre en 16 minutes. Ces mortiers ont dégagé, au moment de la prise, une chaleur remarquable.

Un autre creuset, rempli de même, ayant été chauffé plus vivement, les premières portions de poudre, essayées par l'acide hydrochlorique, retenaient à peine quelques traces de gaz; elles ont fourni un mortier qui, exposé à l'air, a encore dégagé un peu de chaleur, et qui a fait prise en 36 minutes. On l'a immergé en ce moment, mais bientôt il s'est fendillé, ramolli et n'a plus conservé de consistance que dans quelques

points. Au bout de 50 jours, il a été retrouvé totalement délavé, ou décomposé en grumeaux friables.

Le reste du creuset a été partagé en deux portions. La première, contenant beaucoup de parties agglutinées, a eu besoin d'être triturée de nouveau; elle a donné un mortier qui a fait prise à l'air en 21 minutes, et qui s'est bien soutenu à l'immersion. La seconde, complétement scorifiée, est devenue d'un bleu pourpre par la trituration; convertie en mortier, elle a fait prise à l'air au bout de 26 minutes, et n'a point perdu de sa consistance sous l'eau.

Indications données sur les expériences précédentes par l'épreuve à la rupture.

§ 87. Il devenait intéressant de compléter ces recherches par des épreuves à la rupture, et tel a été le but du tableau suivant ; mais nous ferons à ce sujet quelques observations.

Les plâtres-ciments acquièrent une forte consistance en peu de temps. Par exemple, les essais de M. Leroux, à Cherbourg, consignés dans le mémoire déjà cité de M. Mallet, ont été faits au bout de 50 jours environ, et ils ont donné des résultats très-satifaisants. Nous avons même opéré dans un plus court délai; mais il est fort possible que deux mortiers soient égaux au bout d'un an et ne le soient pas à toute autre époque plus rapprochée, surtout quand l'un est immergé, l'autre exposé à l'air, et quand les volumes sont très-petits. Or nous ne pouvions échapper à ce dernier inconvénient; car, à la manière dont nous avons été obligé de fractionner les produits, on sent la difficulté de les obtenir à la fois homogènes et d'un volume un peu considérable. Pour chaque échantillon, nous n'avions jamais plus d'un quart de litre de mortier; ce n'est donc qu'avec réserve qu'il faut admettre les nombres que nous allons donner, et seulement comme pour constater la qualité hydraulique des matières.

NUMÉROS.	MATIÈRES EMPLOYÉES.	VITESSES de prise.	RÉSISTANCES à la rupture par cent^e carré.	ÂGE des mortiers.	OBSERVATIONS.
				Jours.	
1	Pierre anglaise complétement décarbonatée............	"	"	20	Mis hors d'expérience.
2	*Idem* avec chaux commune....	"	0^k,501	50	Immergé.
3	*Idem* surcalcinée...........	15′ à l'eau.	2 ,906	50	*Idem.*
4	Ciment anglais carbonaté.....	14′ à l'air.	7 ,160	35	Exposé à l'air.
5	*Idem*......................	14′ à l'eau.	3 ,282	35	Immergé.
6	*Idem* recuit jusqu'à surcalcinat^n	6^h 30′	"	"	Laissé dans un verre.
7	*Idem* surcalciné plus fortement.	3^h 40′	1 ,224	35	Immergé.
8	*Idem* surcalciné à l'état de scories..................	48′	2 ,350	36	*Idem.*
9	Ciment de Pouilly carbonaté..	5′ à l'air.	1 ,571	34	*Idem.*
10	*Idem*......................	16′	0 ,880	34	*Idem.*
11	*Idem*......................	11′	1 ,922	34	*Idem.*
12	*Idem* complétem^t décarbonaté.	36′ à l'air.	"	30	Décomposé sous l'eau.
13	*Idem* sensiblement fritté.....	21′ à l'eau.	8 ,668	34	Immergé.
14	*Idem* scorifié...............	26′	1 ,436	34	*Idem.*

De l'altération des plâtres-ciments.

§ 88. Le ciment anglais livré au port de Brest en 1824 était conservé dans des barriques bien fermées; celui qui nous a été adressé de Pouilly était dans un double fût, avec un intervalle de 0^m,04 à 0^m,05 rempli de poudre absorbante, de chaux commune ou de charbon pilé : cette méthode est très-dispendieuse sans doute, mais elle est préférable à la première, quand le ciment doit séjourner longtemps dans des magasins. Quoi qu'on fasse cependant, cette matière finit toujours par perdre de son énergie, soit qu'elle retienne encore de l'acide carbonique, soit qu'elle ait été surcalcinée.

En effet, le ciment anglais, qui d'abord faisait prise sous l'eau en 22 minutes, a exigé 21 heures cinq ans après, et sans que les barriques eussent été aucunement ouvertes ni exposées en lieu humide. Le ciment de Pouilly, auquel on peut rendre assez d'énergie pour faire prise à l'air en 5 minutes, a de même exigé 48 minutes, terme moyen, dans les diverses épreuves auxquelles nous l'avons soumis après 4 mois de séjour en magasin. De plus, la barrique ayant été

ouverte tout d'abord, puis refermée moins exactement, cela a suffi pour que les couches de ciment les plus voisines ne donnassent que des mortiers dont les arêtes se déformaient sous l'eau, et qui n'avaient pas encore fait prise au bout de 4 heures.

Quant au ciment surcalciné, celui qui pouvait faire prise d'abord en 15 minutes s'est altéré en 39 jours d'exposition à l'air, de telle sorte qu'il n'a acquis sous l'eau qu'une demi-consistance, pendant 3 jours consécutifs où nous l'avons observé.

Dans les mêmes circonstances, on prévoit aisément que les mortiers ne sont plus susceptibles d'acquérir autant de dureté. Il est vrai que la diminution de ce côté n'est pas proportionnelle à la diminution de vitesse de prise; mais il n'en résulte pas moins que les plâtres-ciments dont on diffère l'emploi perdent leur qualité la plus caractéristique, sinon même la plus précieuse, et que, malgré les précautions usitées pour l'embarrillage, on ne fait que retarder le mal sans pouvoir l'éviter. Si nous joignons à cela les négligences possibles dans la calcination et la pulvérisation, on comprendra comment l'usage des plâtres-ciments est tombé plus d'une fois en défaveur; comment les fabricants ont été accusés de mélanger des matières inertes avec leurs produits, afin d'en augmenter le volume; comment enfin l'excessive cherté de ces mêmes produits, jointe à l'incertitude des avantages, a déterminé beaucoup de constructeurs à ne plus s'en servir.

Des phénomènes chimiques qui accompagnent l'altération des plâtres-ciments.

§ 89. D'après cela, nous avions pensé d'abord qu'il serait préférable d'expédier la pierre à ciment non calcinée, comme cela se pratique déjà pour le plâtre en particulier. Une augmentation de poids de 20 à 30 p. 0/0 eût été compensée par la suppression de l'embarrillage et de tous moyens de conservation. Mais, si l'on peut en agir ainsi dans quelques

localités, ce n'est pas dans toutes à beaucoup près; et rien ne garantit d'ailleurs qu'on saurait atteindre partout le meilleur mode de confection, ou que la quantité de ciment dont on aurait besoin valût la peine qu'elle occasionnerait.

Recherchant donc ce qui se passe dans l'altération des plâtres-ciments, nous avons reconnu d'abord que le ciment surcalciné, exposé à l'air pendant 39 jours, avait absorbé de l'acide carbonique, et nous en avons conclu qu'il devait en être de même, *à fortiori*, pour le ciment incomplétement calciné, parce que la combinaison de chaux et d'argile n'y a pas encore pris autant de cohésion; mais nous n'avons pu admettre que ce gaz, qui se trouve déjà dans une bonne qualité de ciment, devînt nuisible dans une autre circonstance : nous avons regardé comme bien plus probable que sa présence était indifférente dans tous les cas, et que les ciments étaient bons, seulement parce que la chaux et les éléments de l'argile s'y trouvaient dans un état convenable de combinaison.

Nous avons reconnu ensuite que les ciments, pendant qu'ils jouissent de toute leur énergie, ne sont pas solubles dans l'eau, ou du moins que c'est à peine si l'oxalate d'ammoniaque détermine dans l'eau d'immersion le plus léger louche. Les ciments altérés, au contraire, donnent un précipité abondant et susceptible d'être recueilli.

Nous avons remarqué enfin que le ciment surcalciné et celui de Pouilly, qui sont d'une couleur très-foncée, blanchissent en même temps qu'ils s'altèrent; et que, dans l'eau d'immersion, les parties blanches donnent une laitance incapable de se solidifier.

De ces indices nous avons conclu que l'altération des ciments est accompagnée d'une désunion chimique entre la chaux et l'argile qui les composent; que sans doute l'intervalle qui sépare le moment de la préparation de celui de l'emploi permet déjà une décomposition spontanée, mais que l'eau, seule ou aidée de l'acide carbonique, en est la

cause la plus active; qu'ainsi on doit arriver à rendre à ces ciments toute leur énergie primitive, en les soumettant à une nouvelle torréfaction suffisante pour chasser l'eau absorbée, et pour rétablir la combinaison entre la chaux et l'argile.

Telles sont les inductions théoriques qui ont déterminé nos recherches sur la possibilité de tirer parti des ciments altérés. L'expérience les a pleinement confirmées comme on va le voir tout à l'heure.

De la revivification des ciments altérés.

§ 90. Du ciment de Pouilly faisant prise à l'air en 23 minutes a été chauffé au rouge sombre pendant 25 minutes sur une plaque en tôle. Après cette opération, essayé par l'acide hydrochlorique, il contenait encore de l'acide carbonique comme auparavant; converti en mortier, il s'est échauffé et solidifié presque instantanément. La prise a été parfaite en moins de 5 minutes.

Du ciment de même espèce, chauffé plus vivement et dans un creuset, a été partagé en trois portions: la première a fait prise sous l'eau en 8 minutes et demie, la seconde à l'air en 16 minutes, et la troisième en 11 minutes. Toutes trois essayées par l'acide hydrochlorique dégageaient encore beaucoup d'acide carbonique.

Du ciment anglais, faisant prise sous l'eau en 21 heures, a été chauffé au rouge sur une plaque en tôle pendant 28 minutes : cette opération ne l'a point dépouillé de son acide carbonique; gâché et immergé, il a fait prise en 31 minutes.

Du ciment de même espèce, chauffé dans un creuset pendant une heure environ, a été divisé en deux parts : la première, retenant encore un peu d'acide carbonique, a fait prise à l'air en 14 minutes, et la seconde, qui était à peu près dans le même état, a fait prise sous l'eau également en 14 minutes.

Du ciment anglais surcalciné, exposé à l'air pendant 39 jours, et devenu incapable de faire prise sous l'eau en 2 jours, a été chauffé au rouge sur une plaque en tôle pendant 30 minutes. Il retenait encore ce qu'il avait absorbé d'acide carbonique auparavant; toutefois, gâché et immergé, il a fait prise complète en 31 minutes.

Voulant faire des applications de ce genre en grand, nous avons fait passer au four à réverbère, et de la même manière que le sable de gneiss (chapitre v), des barriques entières de ciment altéré. Après cette nouvelle torréfaction, du ciment anglais, qui ne faisait plus prise qu'en 21 heures, a exigé, pour arriver au même terme, 23 minutes tout au plus, soit à l'eau, soit à l'air. Dans les mêmes circonstances, du ciment de Pouilly, qui ne durcissait plus qu'en 2 ou 3 heures, a été ramené à donner de très-bons résultats en 7 ou 8 minutes.

Il demeure donc hors de doute qu'à peu de frais et à l'aide d'une faible incandescence, on remédie à l'altération que les plâtres-ciments éprouvent par un trop long séjour dans les magasins, ou par l'exposition à un air humide.

De la revivification des mortiers de ciments déjà durcis.

§ 91. Les expériences que nous venons de rapporter nous firent concevoir l'espérance de raviver les ciments mouillés accidentellement et déjà durcis, ou les mortiers eux-mêmes. On va voir en effet que la chose est possible, mais à une température beaucoup plus élevée.

Du mortier de ciment de Pouilly, âgé d'un mois et présentant déjà près de 6 kil. de résistance à la rupture par centimètre carré, fut réduit en poudre. Une portion de cette poudre, chauffée au rouge pendant 20 minutes, donna un mortier qui ne s'échauffa nullement et ne durcit point. Une autre portion fut chauffée dans un creuset pendant près d'une heure; les premières couches de ciment changèrent visiblement de couleur, mais ne perdirent pas leur acide carbonique:

elles donnèrent un mortier qui se comporta comme une matière inerte. Les dernières couches, au contraire, furent complétement décarbonatées; on en fit un mortier qui s'échauffa sensiblement après 3 minutes d'exposition à l'air, et se solidifia après 10 minutes; mais immergé en ce moment, il se fendilla et se ramollit.

De la même poudre chauffée plus fortement dans un creuset, et donnant quelques indices de surcalcination, fut gâchée avec de l'eau, mais, par inadvertance, en pâte un peu trop molle. La prise fut néanmoins complète au bout de 4 heures à l'air et se soutint bien à l'eau.

Un autre creuset, chauffé plus vivement encore, donna un mortier qui, exposé à l'air, prit de suite une consistance remarquable; au bout de 6 minutes, la tige d'essai n'indiquait plus aucune dépression à la surface. Il n'y eut pas de chaleur dégagée au moment de la prise.

Un dernier creuset chauffé de la même manière donna également un ciment surcalciné qui fit prise en 8 minutes, sans aucun dégagement de chaleur. Cet échantillon et le précédent furent immergés de suite: l'eau ne les altéra nullement.

Si l'on voulait reproduire en grand ces résultats, ce n'est plus dans le four à pouzzolanes qu'il faudrait opérer, mais bien dans un four à chaux, en ayant l'attention de placer les mortiers ou blocs de ciments durcis à la base de la charge, afin d'obtenir le degré de surcalcination convenable. Ajoutons toutefois que nous n'avons pas encore employé cette méthode de revivification.

Indications données sur les expériences précédentes par l'épreuve à la rupture.

§ 92. De même qu'au § 87, nous avons réuni dans le tableau suivant les résistances à la rupture des échantillons de mortiers dont il a été question dans les deux paragraphes ci-dessus.

NUMÉROS.	MATIÈRES EMPLOYÉES.	VITESSES de prise.	RÉSISTANCES à la rupture par centimètre carré.	ÂGE des mortiers.	OBSERVATIONS.
				Jours.	
1	Ciment de Pouilly............	23' à l'air.	9k,205	35	Laissé à l'air.
2	*Idem* ravivé sur une plaque en tôle	5'	1 ,571	34	Immergé.
3	*Idem*, dans un creuset........	11'	1 ,922	34	*Idem.*
4	*Idem* ravivé par surcalcination..	5'	5 ,243	26	Laissé à l'air.
5	Ciment anglais altéré..........	21 heures.	1 ,487	35	Immergé.
6	*Idem* ravivé sur une plaque en tôle	31'	1 ,966	35	*Idem.*
7	*Idem*, dans un creuset........	14' à l'air.	7 ,160	35	Laissé à l'air.
8	*Idem*......................	14' à l'eau.	3 ,282	35	Immergé.
9	Mortier ravivé par surcalcination	4 heures.	1 ,635	26	*Idem.*
10	*Idem* plus surcalciné	6' à l'air.	1 ,937	26	*Idem.*
11	*Idem*......................	8'	6 ,936	26	Laissé à l'air.

Influence de l'âge des mortiers.

§ 93. Les deux tableaux d'expériences que nous venons de rapporter font voir une différence notable entre les mortiers immergés et les mortiers exposés à l'air, sauf une seule exception, le n° 13 du premier tableau. Ils font voir également des différences entre des échantillons immergés qui, d'après leurs vitesses de prise, semblaient devoir être égaux en qualité. L'âge des mortiers influe-t-il sur ces résultats? C'est ce que nous avons voulu constater, du moins en partie, par quelques essais dont il va être rendu compte dans le tableau ci-joint.

NUMÉROS.	MATIÈRES EMPLOYÉES.	VITESSES de prise à l'air.	ÂGE des mortiers à l'époque de la première épreuve.	RÉSISTANCES à la rupture.	ÂGE des mortiers à l'époque de la deuxième épreuve.	RÉSISTANCES à la rupture.
			Jours.		Mois. Jours.	
1	Ciment de Pouilly avec 1/2 volume d'eau................	46'	22	3k,341	1 19	3k,639
2	*Idem*......................	46	27	4 ,418	4 11	6 ,526
3	*Idem*......................	51	34	8 ,046	1 19	7 ,691
4	*Idem*......................	42	42	6 ,653	4 11	6 ,686
5	*Idem*......................	52	49	5 ,935	4 11	10,961
6	*Idem*......................	51	54	6 ,951	4 11	8 ,904
7	*Idem*......................	47	60	8 ,688	4 11	8 ,980

Tous ces échantillons de mortiers ont été faits le même

jour, avec du ciment de la même barrique, gâchés avec une égale quantité d'eau, et immergés immédiatement après l'instant de prise au contact de l'air; ils étaient tous du volume d'une brique ordinaire. Cependant, malgré la similitude des circonstances, ils ne se sont pas comportés de la même manière, et ont convergé plus ou moins rapidement vers le maximum de résistance qu'ils peuvent acquérir au bout d'un ou de deux ans, par exemple.

Du mélange des sables et pouzzolanes avec les plâtres-ciments.

§ 94. Jusqu'ici nous avons toujours employé le ciment pur, afin de ne point apporter de nouvelles causes d'anomalie dans les résultats; mais il n'est pas moins nécessaire de connaître jusqu'à quel point cette matière peut supporter le mélange des sables ou des pouzzolanes, et, par suite, s'il est possible d'user de ce moyen, pour avoir des mortiers également bons, mais plus économiques. Nous avons, dans ce but, préparé plusieurs échantillons qui ont été soumis à la rupture au bout de 54 jours. C'est trop peu sans doute, d'après ce qui a été dit précédemment : néanmoins, les nombres obtenus s'accordent tous pour démontrer que les sables et les pouzzolanes n'augmentent en rien la qualité des mortiers de ciments, mais qu'on peut sans inconvénient les employer en petite proportion. On en jugera par le tableau suivant :

MATIÈRES EMPLOYÉES.	VITESSES de prise à l'air.	ÂGE des mortiers au moment de l'épreuve.	RÉSISTANCES à la rupture.
1 de ciment de Pouilly avec 1/2 de sable quartzeux	48'	54 jours.	6k,656
Idem avec 1/2 de sable de gneiss	43	*Idem.*	7,987
Idem avec 1/2 de gros sable quartzeux	50	*Idem.*	6,050
Idem avec 1/2 de pouzzolane d'Italie, en gravier.	58	*Idem.*	6,616
Idem avec 1 de sable quartzeux	44	*Idem.*	5,162
Idem avec 1/2 de sable quartz. et 1/2 de pouzzol.	57	*Idem.*	5,927
Idem avec 1 de sable de gneiss	47	*Idem.*	6,173
Idem avec 1 de gros sable quartzeux	1h 2	*Idem.*	4,494
Idem avec 1 de pouzzolane tamisée très-fine	49	*Idem.*	6,702
Idem avec 1 1/2 de sable quartzeux	47	*Idem.*	3,768
Idem avec 1 1/2 de sable de gneiss	1 7	*Idem.*	3,458
Idem avec 2 de sable quartzeux	1 18	*Idem.*	2,664

Quant à la gelivité des mortiers de ciment, nous ne pouvons pas donner de renseignements bien précis. Seulement, nous avons appliqué le procédé de M. Brard à un échantillon de ciment de Pouilly pur, âgé de cinq mois et demi, et durci à l'air. Il s'est sensiblement détérioré dès les premiers jours de l'expérience; et au bout du septième nous avons trouvé $1^g,43$ de déchet sur un poids primitif de 210^g. Diverses espèces de briques essayées en même temps, ainsi qu'un échantillon de mortier de pouzzolane d'Italie, n'ont pas perdu, à beaucoup près, la même proportion de matière. Il est donc à craindre que le mortier de ciment de Pouilly ne soit gelif; et cet inconvénient deviendrait grave surtout si, comme on l'a proposé, on se servait de ce même ciment pour confectionner des objets de moulerie, statues, bas-reliefs, vases, etc., exposés ordinairement à l'intempérie des saisons.

Classification des plâtres-ciments par rapport aux chaux et aux pouzzolanes.

§ 95. Ainsi que nous l'avons dit en commençant ce chapitre, les pierres calcaires avec lesquelles on prépare les plâtres-ciments contiennent une forte proportion d'argile; proportion plus grande que dans les chaux hydrauliques, mais moindre que dans les pouzzolanes calcaires. Établissant donc la série continue des combinaisons que peuvent former la chaux pure et l'argile pure, on sera conduit à la classification suivante, en trois espèces principales de produits.

CHAUX.	ARGILE.	PRODUITS RÉSULTANTS.	CARACTÈRES DISTINCTIFS des produits.
100	0	Chaux très-grasse	Incapable de durcir sous l'eau.
90	10	Chaux un peu hydraulique	Pouvant fuser, comme la chaux pure, au terme de calcination ordinaire, et de plus durcir seules sous l'eau.
80	20	*Idem* bien hydraulique	
70	30	*Idem*	
60	40	Plâtre-ciment	Ne pouvant fuser, quel que soit le degré de calcination, mais pouvant se solidifier seuls sous l'eau.
50	50	*Idem*	
40	60	*Idem*	
30	70	Pouzzolane calcaire (suivant M. Bruyère).	Ne pouvant se solidifier sous l'eau sans addition de chaux grasse ou hydraulique.
20	80	*Idem*	
10	90	*Idem*	
0	100	Pouzzolane d'argile pure	*Idem.*

Les caractères distinctifs rapportés dans ce tableau montrent déjà comment la prédominance de la chaux ou de l'argile se fait sentir à mesure que les proportions varient. Mais les plâtres-ciments ont deux maxima d'énergie, l'un au terme de calcination incomplète, et l'autre au terme de surcalcination : jouissent-ils exclusivement de cette singulière propriété? c'est ce qu'il importe de constater.

1° Le calcaire pur incomplétement calciné s'éteint difficilement, ou même exige qu'on le pulvérise comme le plâtre-ciment. Suivant M. Minard, gâché avec de l'eau et immergé, il se comporte dans le début comme une matière très-énergique; et après quatre jours, dit M. Vicat, il est tout à fait impossible d'y enfoncer le doigt. Mais, à partir de ce moment, la solidification ne fait plus de progrès.

D'autre part, Hassenfratz (page 203 de son *Traité des mortiers*) dit avoir remarqué que de la chaux grasse de Moustier surcalcinée donne, après l'avoir pulvérisée et gâchée, un mortier qui *se durcit assez fortement dans l'eau*. M. Vicat a également annoncé en 1818 que la chaux commune grasse surcalcinée, en contact avec un mélange de charbon et de houille, et devenue incapable de s'éteindre, donne, en la triturant et l'arrosant, *une pâte qui durcit sous l'eau*.

Il est inutile de rappeler qu'au terme de calcination complète les chaux grasses sont absolument incapables d'acquérir seules sous l'eau aucune espèce de consistance. Ainsi donc, quelque faible que soit l'hydraulicité des calcaires purs, aux termes de calcination incomplète et de surcalcination, il n'en est pas moins vrai qu'elle existe déjà comme dans les plâtres-ciments.

2° Avant que M. Lacordaire eût monté l'exploitation de Pouilly telle qu'elle a été décrite (§ 83), il avait reconnu qu'un calcaire à chaux peu hydraulique, et contenant encore une certaine dose d'acide carbonique, fournissait un véritable ciment; et il avait mis à profit cette observation pour les travaux du canal de Bourgogne, dont il était chargé. Pour cela,

il employait les fours ordinaires du pays; il réduisait à trois jours la durée du feu, qui est communément de 6 à 8; il éteignait ensuite sa chaux par immersion, et il en séparait les parties sous-carbonatées, qu'il incorporait dans le mortier, après les avoir réduites mécaniquement en poudre.

Nous avions pensé d'abord que ce procédé rentrait dans le premier; que le calcaire commun de Pouilly, alternant avec les marnes irisées, contenait comme elles des rognons d'argile de Parker; et que, si M. Lacordaire avait préféré extraire ses matériaux par galeries souterraines plutôt qu'à ciel découvert, c'était sans doute parce qu'il avait trouvé des gisements plus riches et un triage plus facile. Mais l'un de nos amis, M. l'ingénieur Avril, à qui nous avons communiqué nos recherches, a profité de son séjour à Pouilly pour examiner avec beaucoup de soin cette question. Il nous a annoncé qu'effectivement le calcaire commun de Pouilly convenablement traité, et retenant environ 15 centièmes d'acide carbonique, faisait prise sous l'eau en cinq minutes, et ne le cédait en rien au plâtre-ciment; qu'il ne pouvait dès lors expliquer la préférence accordée à l'emploi des rognons d'argile que parce qu'on craignait de ne pas atteindre aussi facilement le degré de calcination nécessaire, cela étant fondé d'ailleurs sur ce que les limites de grande énergie sont moins étendues dans un cas que dans l'autre. Il a découvert enfin que ce calcaire à chaux hydraulique de Pouilly, *convenablement surcalciné*, jouissait des mêmes propriétés qu'à l'état de sous-carbonate.

Des essais directs sur quelques fragments de calcaires à chaux hydrauliques de Pompéan (Ille-et-Vilaine), et de Doué (Maine-et-Loire), nous portent à conclure que ces propriétés sont communes à toutes les pierres de composition analogue.

3° Les bonnes pouzzolanes produites, d'un côté, par une torréfaction de quelques minutes sur des plaques en tôle, et d'un autre côté, par des briques ocreuses ou réfractaires, bien cuites, nous semblaient d'abord établir également pour les argiles deux maxima d'énergie; mais les expériences du cin-

quième chapitre (§ 77 et 78), démontrent que ces deux degrés de chaleur n'en forment réellement qu'un seul et même; et que les matières deviennent d'autant plus inertes qu'on approche davantage du terme de la vitrification.

Quant aux argiles contenant au moins un dixième de chaux, elles n'exigent, suivant M. Treussart, que le degré de chaleur correspondant à la brique peu cuite; et au-delà elles deviennent d'un usage de plus en plus médiocre. A la transition entre les pouzzolanes et les plâtres-ciments, quand la proportion de chaux est de 20 à 30 centièmes, en est-il encore de même? c'est ce que nous ignorons. Mais il est possible qu'alors l'influence de la chaux soit encore assez marquée pour donner naissance à deux maxima d'énergie.

Représentation géométrique de l'influence de la chaleur sur les composés divers de chaux et d'argile.

§ 96. Afin de faire mieux ressortir l'influence de la chaleur sur ces composés divers de chaux et d'argile, nous allons essayer de la représenter géométriquement. Pour cela, concevons qu'à partir d'un point fixe on trace deux axes rectangulaires, dont l'un horizontal sera pris pour axe des abscisses, et l'autre vertical, pour axe des ordonnées. Supposons ensuite que sur l'axe des abscisses on prenne, à partir de l'origine, des longueurs proportionnelles à quelques degrés principaux de torréfaction ou cuisson; que, par exemple, on choisisse pour la première le degré de cuisson médiocre de la brique; pour la deuxième, le degré de bonne cuisson de la brique; pour la troisième, le degré de calcination complète de la chaux commune, et pour la quatrième enfin, le degré de surcalcination de la même chaux. Si alors on élève des ordonnées par ces points de division, et si l'on considère un même composé de chaux et d'argile soumis aux degrés de chaleur correspondants, on pourra reporter sur ces ordonnées des longueurs proportionnelles à l'énergie hydraulique de chaque produit particulier, puis, par les extrémités de ces longueurs,

faire passer une courbe continue, qui sera la *courbe d'énergie* du composé, chaux hydraulique, plâtre-ciment, pouzzolane ou même chaux grasse.

Telle est la manière dont nous avons construit les figures 35, 36, 37, 38 et 39. Entrons maintenant dans quelques détails sur chacune d'elles :

1° La figure 35 représente la courbe d'énergie des calcaires à chaux grasses. Cette courbe a une ordonnée nulle à l'abscisse n° 3, terme de calcination complète; mais aux abscisses n°s 2 et 4, les ordonnées sont déjà sensibles, car elles correspondent à une hydraulicité faible, il est vrai, mais réelle.

2° La figure 36 représente la courbe d'énergie des calcaires à chaux hydrauliques. A l'abscisse n° 3, l'ordonnée varie beaucoup en raison de la dose d'argile contenue; mais elle est nécessairement plus grande que zéro, et moindre que les ordonnées n°s 2 et 4, par cela même que, d'une part, les chaux sont hydrauliques par supposition, et que, d'autre part, on obtient une vitesse de prise instantanée comme celle des plâtres-ciments, et une amélioration dans la dureté des mortiers.

3° La figure 37 représente la courbe d'énergie des calcaires à plâtres-ciments. Pour quelques-uns, l'ordonnée n° 3 est à peu près nulle : en est-il de même pour tous? nous ne le pensons pas. On sait en effet que les meilleures chaux hydrauliques ne sont pas celles qui contiennent le plus d'argile; que, par exemple, dans la fabrication des chaux hydrauliques artificielles, on recommande la proportion de 20 à 25 centièmes d'argile, comme étant la plus convenable. D'après cela, l'ordonnée n° 3, qui est nulle pour les chaux grasses, augmenterait progressivement jusque pour les chaux à 25 centièmes d'argiles, puis redescendrait d'une manière continue pour les chaux à 30 centièmes, pour les plâtres-ciments à 40, à 50 et à 60 centièmes, et finirait par redevenir nulle. Nous ne donnons du reste cette explication que comme une simple induction théorique.

4° La figure 38 représente la courbe d'énergie des argiles calcaires employées comme pouzzolanes. Le maximum de cette courbe est à l'abscisse n° 1, terme de la brique peu cuite. Les argiles, qui par la teneur en chaux se rapprochent le plus des calcaires à plâtres-ciments, jouissent peut-être d'un second maximum d'énergie; mais nous n'avons fait que le tracer en lignes ponctuées.

5° La figure 39 représente la courbe d'énergie des argiles non calcaires. Cette courbe n'a qu'un seul maximum à l'abscisse n° 2, terme de la brique bien cuite.

On voit, en résumé, que chacun des composés de chaux et d'argile est caractérisé par certaines propriétés qui varient du plus au moins, suivant la prédominance de l'un des composants; que les argiles n'ont qu'un seul maximum d'énergie, mais que les chaux en ont deux, et qu'ainsi les plâtres-ciments n'offrent qu'un cas particulier d'un phénomène général.

CHAPITRE VII.

DE L'ALTÉRATION DES CHAUX HYDRAULIQUES, ET DE LA SOLIDIFICATION DES MORTIERS EN GÉNÉRAL.

Influence de l'extinction spontanée sur les chaux en général.

§ 97. La chaux que l'on prépare n'est pas toujours employée à sa sortie du four : il importe donc de savoir quelles modifications le temps apporte à ses propriétés, et quelles précautions exigent sa conservation, ou son emploi après avoir été altérée.

Quand la chaux vive est abandonnée au contact de l'air, elle absorbe l'humidité et l'acide carbonique qui s'y trouvent répandus, plus encore, suivant M. Treussart, une certaine quantité d'oxigène. En même temps elle se fendille et tombe en poussière, phénomène qui est désigné sous le nom d'*extinction spontanée.*

Pendant longtemps, on a cru que cette chaux éventée ne valait plus rien; mais on avait généralisé mal à propos une conséquence qui n'est vraie que pour une espèce particulière de chaux. En effet, M. Vicat a reconnu, 1° que les chaux grasses ne perdent pas de leurs qualités, et donnent même des résultats supérieurs à ceux qu'on obtient par l'extinction ordinaire ou par immersion; 2° que pour les chaux hydrauliques, au contraire, l'extinction spontanée est d'autant plus désavantageuse que l'énergie de la matière était d'abord plus grande.

On doit à M. Treussart d'avoir complété cette dernière observation, en recherchant le rapport qui existe entre le degré d'altération de la chaux et le temps écoulé depuis son exposition à l'air. Voici quelques-unes de ses expériences :

	EMPLOYÉE immédiatement.	EMPLOYÉE après 15 jours.	EMPLOYÉE après 1 mois.	EMPLOYÉE après 2 mois.	EMPLOYÉE après 3 mois.	OBSERVATIONS.
Chaux hydraulique d'Obernai, avec 2 parties de sable.......	55k	35k	20k	15k	<10k	Ces nombres expriment la résistance à la rupture, comme il a été dit au § 84.

Ces échantillons de mortier avaient été tenus sous l'eau. On voit donc que tout retard dans l'emploi de la chaux hydraulique tend à en faire une chaux commune, et que, dans de grands travaux, une circonstance de ce genre peut devenir extrêmement funeste.

De la manière de conserver les chaux hydrauliques.

§ 98. Dans l'altération des chaux hydrauliques, il faut tenir compte de l'influence de l'eau qui produit l'extinction, et de l'influence du contact de l'air. Tant que la quantité d'eau absorbée ne dépasse pas un quart du poids de la chaux, celle-ci reste en poudre sèche; elle ne saurait se solidifier;

et l'expérience démontre qu'alors elle peut se conserver sans altération, pourvu qu'on l'abrite soigneusement du contact de l'air, par exemple, dans des barriques hermétiquement fermées, comme on le fait pour les plâtres-ciments. Mais si cette poudre, que l'on obtient aisément en immergeant la chaux vive pendant 20 ou 30″ dans l'eau, est exposée à l'air, elle s'y comporte à peu près comme dans le cas de l'extinction spontanée; elle devient chaux commune. Or, sur les ateliers où l'on doit avoir de grands approvisionnements, il n'est guère possible d'enfermer la chaux, vive ou éteinte par immersion dans des barriques, qui seraient dispendieuses par leur nombre et gênantes par leur encombrement. On se résigne alors à un moyen terme, qui consiste à entasser la chaux vive sous des hangars bien clos, et à l'envelopper de toutes parts avec une couche de chaux déjà réduite en poudre d'une manière quelconque; on oppose ainsi un obstacle à la circulation de l'air, et on préserve de son influence les parties internes de la masse.

Si ce procédé n'est pas parfait, au moins il est économique; et si toute la couche pulvérulente qui sert d'enveloppe ne doit plus être employée comme chaux hydraulique, il reste un moyen d'en tirer parti, comme on va le voir tout à l'heure.

De l'emploi des pouzzolanes pour remédier à l'altération des chaux hydrauliques.

§ 99. Pour rendre les chaux grasses durcissantes à l'eau, on les mêle avec des pouzzolanes; or les chaux hydrauliques altérées, avons-nous dit, agissent comme la chaux commune: donc, si l'assimilation est exacte, le même procédé doit leur être applicable. C'est en effet ce qui arrive, et on observe alors que l'intensité de l'altération n'a plus d'influence sensible sur la dureté que les matières acquièrent au bout d'un an. M. Treussart est le premier qui ait insisté sur ce fait important; voici quelques-unes de ses expériences:

	EMPLOYÉE vive.	EMPLOYÉE après 1 mois.	EMPLOYÉE après 2 mois.	EMPLOYÉE après 3 mois.	EMPLOYÉE après 4 mois.
Chaux hydraulique d'Obernai éteinte spontanément et mêlée avec 1 de sable et 1 de trass...........................	95k	177k	160k	144k	225k

	EMPLOYÉE vive.	EMPLOYÉE après 15 jours.	EMPLOYÉE après 25 jours.	EMPLOYÉE après 35 jours.	EMPLOYÉE après 45 jours.	EMPLOYÉE après 2 mois.
Chaux hydraulique d'Obernai éteinte d'abord par immersion, puis mêlée avec 1 de sable et 1 de trass....................	215k	150k	135k	130k	138k	136k

Les chaux hydrauliques employées vives peuvent elles-mêmes, d'après M. Vicat, supporter d'autant plus avantageusement les pouzzolanes, qu'elles sont moins énergiques, et, d'autre part, elles s'altèrent d'autant plus vite qu'elles sont plus énergiques : il faut donc conclure de là que si une chaux hydraulique a été exposée à quelque cause d'altération, il est prudent de la mêler avec une certaine dose de pouzzolane, sans avoir égard à son degré d'énergie primitive. Les chaux hydrauliques artificielles sont, bien entendu, comprises dans le même cas.

De la conservation des pouzzolanes.

§ 100. Quant aux pouzzolanes factices, on concevra sans peine que leur conservation exige peu de soins, parce que déjà l'on sait que, d'après leur gisement, les pouzzolanes naturelles sont exposées à toutes les intempéries des saisons, sans que leur énergie paraisse s'affaiblir dans un laps de temps considérable. Nous dirons toutefois qu'une pouzzolane nouvellement fabriquée et bien sèche, par cela même qu'elle jouit d'une grande faculté absorbante, ne laisse pas que d'avoir de l'influence sur la vitesse de prise des mortiers. En

effet, souvent les mortiers sont gâchés trop mous; à de la chaux déjà éteinte en bouillie les ouvriers ajoutent encore de l'eau pour faciliter leur travail : or l'eau excédante est absorbée en partie par la pouzzolane, et le mortier conserve une plus forte consistance, favorable à la réaction des éléments. Sous ce rapport, il est donc avantageux de tenir les pouzzolanes à l'abri de l'humidité, ou du moins, si elles ont été mouillées, de les faire sécher à l'air ou au soleil, avant d'en faire usage.

De la solidification des chaux grasses.

§ 101. La préparation et la conservation des chaux, des pouzzolanes et des plâtres-ciments se lient si intimement à la connaissance de leurs propriétés, que nous croyons faire une chose utile en ajoutant aux indications déjà données quelques développements relatifs à la théorie des mortiers en général [1].

Pour procéder du simple au composé, exposons d'abord ce qui concerne la chaux commune ou chaux grasse. Lorsqu'on la plonge sous un volume d'eau indéfini, elle absorbe rapidement et solidifie une quantité d'eau égale à peu près aux 0,22 de son poids. Retirée alors et abandonnée au contact de l'air, elle fuse avec dégagement de chaleur, et se réduit en poudre sèche et impalpable. Dans cet état, elle peut encore absorber beaucoup d'eau, mais sans dégagement sensible de chaleur, et il en résulte une pâte plus ou moins ferme. Les premières portions de liquide forment avec la chaux une véritable combinaison chimique, connue sous le nom d'*hydrate de chaux ;* les autres sont simplement *interposées*. Aussi de la chaux en pâte ferme peut regorger, par le rebattage, assez d'eau pour qu'il devienne inutile d'en ajouter de nouvelle dans la confection même du mortier. L'hydrate de chaux, au contraire, ne peut être décomposé qu'à une haute température.

Cet hydrate étant en poudre sèche, ses molécules sont trop

[1] Dans une note manuscrite, communiquée à M. Vicat au commencement de 1826, et mentionnée dans son dernier ouvrage sur les mortiers, nous avons déjà émis plusieurs des propositions qui vont suivre.

écartées les unes des autres pour pouvoir s'accoler et repasser à l'état de masse compacte : ce n'est donc qu'après l'avoir réduit en pâte qu'il est susceptible d'emploi. Cela posé, tout le monde sait que la chaux grasse peut se conserver indéfiniment en pâte, si on la prive du contact de l'air; que la même chaux, à la température ordinaire ou à une haute température, en pâte ou en dissolution dans l'eau, est sans action chimique sur le sable quartzeux, réduit ou non en poussière très-fine; que les mortiers qui résultent du mélange de ces deux matières se conservent mous comme la chaux elle-même, ainsi que l'a constaté M. John, en examinant d'épaisses maçonneries dont la construction datait de plus de deux siècles. Mais si on laisse la chaux en pâte ou les mortiers au contact de l'air, ils se solidifient; et si on remplace l'air par de l'acide carbonique pur, la solidification a lieu avec plus de rapidité encore. C'est qu'en effet, dans l'un et l'autre cas, l'acide carbonique est absorbé par la chaux, et que ce phénomène se continue jusqu'à ce que l'acide soit à la base dans le rapport approximatif de 43 à 57, comme dans les sous-carbonates de chaux naturels. Mais, chose digne de remarque, la proportion d'eau qui constituait d'abord la chaux à l'état d'hydrate n'est point rejetée : le carbonate n'est donc pas *régénéré* comme avant la calcination, et on a réellement un sel double, qu'on peut appeler *hydro-carbonate* de chaux.

On voit en résumé que, pour la solidification des chaux grasses, 1° la proportion d'eau doit être plus grande que dans l'hydrate sec ; 2° il doit y avoir contact de l'air, ou mieux, de l'acide carbonique pur; 3° le mélange des sables quartzeux, sans le contact de l'air, n'a pas la moindre influence. De là vient la supériorité que donne aux mortiers la chaux éteinte spontanément, et par conséquent déjà carbonatée en partie. De là aussi l'impossibilité où sont ces matières de durcir sous l'eau, puisque celle-ci en général ne contient que des quantités inappréciables d'acide carbonique en dissolution.

Ainsi que l'a remarqué M. Vicat, la solidification se propage

de la surface vers le centre des échantillons; or la quantité de gaz qui peut arriver à travers les vides du mortier est trop peu de chose au-delà d'une petite épaisseur, pour que son influence directe soit sensible : si donc il n'y a pas cessation totale d'absorption, il faut admettre que la transmission se fait par le jeu des affinités, par la tendance que les diverses couches concentriques de chaux ont à se mettre en équilibre de saturation, de la même manière que l'on explique, par exemple, la transmission de la chaleur dans les corps solides. Par suite, il faut admettre également que l'équilibre est d'autant plus difficile à atteindre que les parties à saturer sont plus éloignées de la surface et que la dose d'acide carbonique reçue est déjà plus considérable, de sorte que l'épaisseur des mortiers est nuisible à leur solidification, que dans des temps égaux les accroissements de dureté sont loin d'être égaux, et diminuent de plus en plus, qu'enfin, s'il est exact de dire que les mortiers à chaux grasse gagnent en vieillissant, néanmoins l'amélioration ne peut plus être sensible au bout d'un petit nombre d'années.

Des caractères distinctifs des chaux maigres et hydrauliques.

§ 102. Les calcaires naturels contiennent souvent des oxides terreux ou métalliques, qui, par la calcination, se combinent avec la chaux. De là résultent des modifications dans ses propriétés. Ainsi on a reconnu que la chaux reste grasse tant que les corps étrangers ne forment pas un dixième de son poids; mais au-delà elle devient maigre, c'est-à-dire foisonne beaucoup moins par l'extinction; et, si parmi ces corps étrangers la silice prédomine, la pâte acquiert en outre la propriété de durcir sous l'eau, avec ou sans addition de sable. On a cru pendant longtemps que d'autres oxides étaient dans le même cas que la silice; mais la méthode d'investigation suivie par M. Berthier ne laisse aucun doute à cet égard. Nous allons en donner un aperçu.

Comparant d'abord la qualité de diverses chaux avec leur composition chimique, M. Berthier a trouvé :

Chaux grasse de Château-Landon, 96,4 de chaux pure, 1,80 de magnésie, 1,80 d'argile (silice et alumine) ;

Chaux maigre de Coulommiers, 78,0 de chaux pure, 20,0 de magnésie, 2,0 d'argile (silice et alumine) ;

Chaux moyennement hydraulique de Saint-Germain, 89,0 de chaux pure, 1,0 de magnésie, 10,0 d'argile (silice et alumine) ;

Chaux très-hydraulique de Senonches, 70,0 de chaux pure, 1,00 de maguésie, 29,0 de silice.

A ces analyses nous ajouterons :

Chaux maigre de Brest, 82,3 de chaux, 10,0 d'oxide de fer, 7,7 d'argile.

D'où l'on voit que la silice pure ou mélangée d'alumine rend la chaux hydraulique, et que la magnésie ou l'oxide de fer la rendent maigre non hydraulique. M. Berthier a également retrouvé la même conséquencepar la synthèse; il a vu que la silice en gelée, calcinée avec de la chaux pure, donnait un produit hydraulique; que l'alumine, la magnésie, l'oxide de fer et celui de manganèse, calcinés un à un avec de la chaux pure, ne donnaient qu'une chaux maigre; que l'alumine ou la magnésie, mêlées avec la silice, exaltaient la propriété hydraulique; qu'enfin les proportions les plus favorables pour ce mélange étaient celles qui formaient parties égales de silice d'une part, et d'alumine ou de magnésie d'autre part.

De ces considérations résulte une conséquence qu'il importe de mentionner : c'est que le procédé de M. Vicat pour prépa rer des chaux hydrauliques artificielles ne convient pas également en prenant une chaux quelconque et une argile quelconque; qu'il est difficilement applicable aux chaux maigres, mêlées avec des argiles ocreuses ; que c'est ainsi qu'à Brest, où les matières premières sont chargées d'oxide de fer, on n'a pu obtenir rien de passable, et qu'on a été obligé de revenir à l'emploi des pouzzolanes.

De la solidification des chaux hydrauliques.

§ 103. La chaux hydraulique éteinte à la manière ordinaire

solidifie, comme la chaux grasse, une certaine quantité d'eau, et forme dans la portion de liquide excédante une pâte plus ou moins ferme. Si on la laisse exposée à l'air, elle absorbe de l'acide carbonique, moins que la chaux grasse, et elle retient également l'eau qu'elle avait solidifiée. On a en effet, suivant M. Vicat:

Pour cent parties de chaux grasse,

Acide carbonique absorbé........	74,
Eau retenue.....................	17;

et pour cent parties de chaux hydraulique contenant un cinquième de son poids d'argile,

Acide carbonique absorbé........	54;
Eau retenue.....................	15:

mais ce dernier résultat peut se mettre sous la forme suivante:

Chaux pure....................	100;
Argile........................	25;
Acide carbonique..............	67,5;
Eau...........................	18,7.

Il diffère alors très-peu de celui qui concerne la chaux grasse, de sorte qu'on a également un *hydro-carbonate* de chaux, et que l'argile paraît être en dehors de la combinaison.

Au contraire, quand la pâte reste immergée sous l'eau, le concours de l'acide carbonique n'est plus possible, et celui de la silice devient indispensable pour la solidification. Il s'agit maintenant de rechercher la cause de ce phénomème.

1° La chaux pure est soluble dans cinq à six cents fois son poids d'eau, et produit ce que l'on nomme *eau de chaux*.

2° La chaux pure combinée par la calcination avec de la silice en gelée n'est soluble dans l'eau que partiellement, et donne un résidu composé de 65 parties de silice et 35 de chaux: il est connu sous le nom de *silicate neutre de chaux*.

3° La chaux pure combinée de la même manière avec de l'alumine, de la magnésie, de l'oxide de fer ou de manganèse, quoiqu'elle ait perdu sa propriété de foisonner beaucoup par l'extinction, est cependant encore soluble dans l'eau, et le

résidu ne contient plus autre chose que de l'alumine pure, ou de la magnésie, ou des oxides de fer et de manganèse.

4° Pour qu'une chaux soit déjà hydraulique, il suffit de 6 à 7 centièmes de silice, proportion qui ne peut rendre insoluble qu'une très-petite dose de chaux.

5° Les plâtres-ciments au terme de calcination complète peuvent être assimilés aux chaux ordinaires, et cependant ils sont peu hydrauliques, quoique la dose de silice y soit très-considérable.

Donc l'on voit déjà que la combinaison de la silice avec la chaux a seule l'avantage d'être inattaquable par l'eau; que si l'alumine et quelques autres oxides exaltent les propriétés hydrauliques, cela tient probablement à ce que l'obstacle qu'ils apportent au foisonnement de la chaux facilite par cela même le rapprochement des molécules et leur prédisposition à subir l'influence du silicate de chaux; qu'enfin la chaux libre, malgré sa solubilité, doit toujours rester en prédominance dans la pâte immergée.

La question étant ainsi posée, il faut expliquer deux effets, l'insolubilité et la dureté que les mortiers acquièrent sous l'eau. D'abord on ne saurait admettre que le silicate de chaux se solidifie isolément, et qu'il enveloppe l'hydrate comme dans une gangue; car ce dernier n'en resterait pas moins soluble, et la dureté acquise devrait être proportionnelle à la quantité de silicate, ce qui n'est pas vrai en général. Tout porte à croire plutôt que les molécules de silicate sont comme autant de centres d'attraction par rapport aux molécules solubles, et qu'il en résulte dans la sphère d'activité de chacune d'elles un arrangement qu'on peut assimiler à une véritable *cristallisation.*

Dans cette hypothèse, on conçoit que la proportion de silicate la plus convenable est celle qui laisse autour de chaque molécule une couche d'hydrate égale en épaisseur au rayon de la sphère d'attraction; qu'en dessous de ce terme, c'est-à-dire à mesure que le silicate devient plus abondant, les couches d'hydrate interposées sont soumises à des attractions qui se

contrarient au lieu de s'ajouter; qu'en dessus, c'est-à-dire quand le silicate est très-peu abondant, les couches d'hydrate peuvent se solidifier encore, non plus aussi vite, ni par l'action directe du silicate, mais par l'influence des particules les plus voisines, qui, à mesure qu'elles se solidifient, réagissent à leur tour sur les autres; de même que, dans une dissolution saline, un cristal déjà formé peut devenir seul une cause de cristallisation.

On conçoit de la même manière que les mortiers hydrauliques ont plutôt besoin d'humidité que de sécheresse, parce que l'eau, conservant aux molécules une certaine mobilité, leur permet de s'accoler suivant les facettes les plus convenables. Il ne faut pas en conclure néanmoins que les mortiers mous devraient être préférables aux mortiers en pâte bien ferme, car l'eau, augmentant outre mesure l'écartement des molécules, les rejette par cela même en dehors de leur sphère d'attraction mutuelle : de là une des causes qui rendent les mortiers hydrauliques généralement moins durs à leur surface libre que dans leurs parties centrales, tandis que l'inverse a lieu pour tous les mortiers à chaux grasse durcis au contact de l'air.

Influence de l'action dissolvante de l'eau.

§ 104. Ce fait tient encore à une autre cause sur laquelle il importe d'insister.

Quand on immerge un mortier hydraulique au fond d'un bassin quelconque, on met en présence deux forces moléculaires opposées : d'un côté, l'action du silicate de chaux sur l'hydrate, et de l'autre la force dissolvante de l'eau par rapport à ce même hydrate. L'eau étant supposée tranquille, les tranches inférieures dissolvent de la chaux; mais comme alors elles deviennent plus denses, elles restent à fond, sans pouvoir se renouveler d'elles-mêmes; et la chaux ainsi dissoute ne parvient aux tranches supérieures de liquide que par le jeu des affinités, par une transmission analogue à celle de l'acide carbonique dans l'intérieur des mortiers à chaux grasses. Quoi qu'il en soit

d'ailleurs, la tranche en contact immédiat avec le mortier perdant de son action dissolvante à mesure qu'elle approche du terme de saturation, l'équilibre s'établira bientôt entre les deux forces moléculaires opposées, et alors toute dissolution cessera. Mais cet équilibre, par rapport à l'avancement de la solidification, ne sera qu'instantané, si la couche superficielle du mortier n'a perdu qu'une petite portion de son hydrate : cette couche pourra en effet continuer à prendre de la cohésion par l'influence déterminante des couches suivantes non attaquées par l'eau.

Si, au contraire, on agite le liquide pour rendre le degré de saturation uniforme dans toute sa masse, ou mieux encore, si le mortier est immergé dans une eau courante, il peut arriver que les couches extérieures soient privées peu à peu de tout ou de la plus grande partie de leur hydrate; mais cet effet n'étant pas instantané, les couches centrales sont protégées pendant un temps assez long pour que leur cohésion l'emporte sur l'action dissolvante de l'eau, au moment où elles seraient atteintes à leur tour. On conçoit ainsi que les mortiers puissent se délaver jusqu'à une certaine profondeur, et que l'épaisseur soit un élément indispensable au succès de la solidification.

Influence des sables quartzeux.

§ 105. Comme on est dans l'usage de ne pas employer la chaux hydraulique pure, mais de la mélanger avec des sables, il devient important d'étudier leur influence sur la solidification. Toutefois nous ne parlerons ici que des sables quartzeux, qui sont en même temps les plus communs.

Il est bien démontré par l'expérience que la chaux caustique est sans aucune action à froid ou à chaud sur le quartz en particules discernables : si donc il ajoute à la qualité des mortiers hydrauliques, ce ne peut être que, 1° parce qu'il augmente la densité de la masse, et empêche ainsi qu'elle ne soit trop facilement perméable à l'eau et amenée à l'état

de mortier mou; et 2° parce que son adhérence à la chaux, quelque faible qu'on la suppose d'abord, est une cause accélératrice de cristallisation. Il n'est pas nécessaire pour cela de supposer que le sable exerce une action chimique sur la chaux; car, en s'appuyant sur l'analogie, on sait, par exemple, que dans la préparation du sucre candi, dans celle du verdet ou acétate de cuivre, il suffit de tendre des fils ou de placer des baguettes de bois dans les dissolutions, pour déterminer les cristaux à se grouper tout autour en forme de grappes, tandis qu'ailleurs rien encore ne se manifeste. Les sables ne font ainsi que seconder la tendance des chaux hydrauliques à prendre de la cohésion, et leur influence est nulle là où cette tendance n'existait pas d'abord, par exemple dans les chaux grasses. Si l'on examine attentivement les expériences faites avec ces dernière chaux, on reconnaît effectivement qu'elles durcissent mieux seules que mélangées de sable; que les particules d'hydro-carbonate ont entre elles plus de cohésion qu'elles n'ont d'adhérence avec le sable; d'où il suit naturellement que les sables qui divisent le mieux la masse, c'est-à-dire les sables les plus fins, sont les plus mauvais, parce que dans une même section l'étendue des surfaces de contact est plus grande. Pour les chaux hydrauliques, le contraire a lieu, suivant M. Vicat; et si quelques expériences de M. Treussart ne concordent pas sous ce rapport, cela paraît tenir à la trop grande quantité de sable employée dans le dosage de ses mortiers.

De la solidification des chaux hydrauliques altérées.

§ 106. Nous avons vu, au commencement de ce chapitre, que les chaux hydrauliques éteintes spontanément au contact de l'air, et dont on diffère l'emploi, perdent de plus en plus de leur énergie; nous ajouterons à cela un fait analogue que nous avons eu l'occasion d'observer: c'est que de la chaux hydraulique de Doué, conservée pendant deux ans dans des flacons bien bouchés, de manière à éviter le renouvellement de l'air et

l'absorption de l'humidité, est restée en fragments, il est vrai; mais ces fragments ont perdu la propriété de fuser, et de faire prise sous l'eau, après les avoir gâchés comme du plâtre. Que se passe-t-il alors? C'est ce qu'il s'agit d'expliquer.

Tout le monde sait que la pierre à chaux hydraulique traitée, avant la calcination, par de l'acide hydrochlorique, laisse généralement un résidu insoluble formé de silice et alumine; mais qu'immédiatement après la calcination, la même pierre devenue chaux vive est complétement soluble; ce qui constate l'existence d'une combinaison chimique: cela posé, nous avons pris de la chaux hydraulique fusée à l'air depuis deux mois, nous l'avons traitée par l'acide hydrochlorique en excès, et elle a donné un résidu gélatineux déjà remarquable; nous avons traité de même de la chaux hydraulique conservée depuis deux ans, et le résidu gélatineux a été tellement abondant, que nous sommes porté à admettre qu'il n'y avait pas de silice en dissolution avec la chaux. Mais, quoi qu'il en soit, n'est-il pas évident alors que le silicate de chaux s'est décomposé, au moins en partie; qu'ainsi, dans le phénomène de l'altération des chaux hydrauliques, la silice prend de la cohésion, ne doit plus être considérée que comme mêlée intimement avec la chaux, et par conséquent ne peut plus faire que l'office de pouzzolane mêlée à petite dose avec une chaux commune. De là la grande médiocrité des résultats, et la nécessité d'y remédier par la méthode de M. Treussart.

De la solidification des mortiers à pouzzolanes.

§ 107. Passons maintenant au cas des mortiers à pouzzolanes. D'après ce qui a été dit précédemment, la condition indispensable pour qu'une chaux puisse se solidifier sous l'eau, c'est qu'une petite proportion de cette même chaux soit d'abord rendue insoluble, et que chacune de ses particules devienne ainsi centre d'attraction par rapport aux couches d'hydrate environnantes. Cette condition est-elle remplie en mêlant des chaux communes avec des pouzzolanes? C'est ce

que M. Vicat a mis hors de doute, en faisant voir que les pouzzolanes ont la propriété de précipiter la chaux de sa dissolution dans l'eau, et que leur énergie est proportionnelle à la quantité d'eau de chaux ainsi dépouillée. Quelle que soit la cause de cette propriété, qu'elle tienne ou non à une combinaison chimique entre la chaux et la pouzzolane, combinaison difficile à concevoir, vu l'état de cohésion de la silice beaucoup plus prononcé assurément que dans les chaux hydrauliques altérées, il n'en est pas moins vrai que ce fait suffit pour établir une analogie satisfaisante entre la solidification des mortiers à pouzzolanes et celle des mortiers à chaux hydrauliques. On conclut de là que le mélange des pouzzolanes avec les chaux peu hydrauliques doit donner de bons résultats, parce que dans ces chaux la proportion d'hydrate cesse d'être surabondante; qu'avec les chaux très-hydrauliques, au contraire, ce mélange devient nuisible, parce qu'alors la proportion d'hydrate devient trop faible, et donne une espèce de plâtre-ciment au terme de calcination complète.

Les pouzzolanes s'emploient comme les sables, dans la proportion de 1 1/2 à 2 1/2 en volume, pour 1 de chaux en pâte. Sans doute cette proportion suppose beaucoup plus de silice qu'il n'en faut dans les chaux hydrauliques; mais on doit remarquer que, dans ce dernier cas, toutes les particules agissent dans les circonstances les plus favorables possibles, tandis que, dans le premier, elles sont agglomérées en grains plus ou moins volumineux, n'agissent que par des surfaces, et encore leur action est-elle être affaiblie par la cohésion qu'elles possèdent déjà à un haut degré.

De la solidification des plâtres-ciments.

§ 108. Voyons, en dernier lieu, jusqu'à quel point les principes admis précédemment peuvent servir à expliquer la solidification des plâtres-ciments, dans le cas le plus général,

c'est-à-dire tel qu'il a été développé à la fin du chapitre VI (§ 96).

1° Dans les chaux grasses imparfaitement calcinées ou surcalcinées, les particules carbonatées ou surcalcinées ayant besoin d'être gâchées pour faire pâte avec l'eau, et ne pouvant se convertir que difficilement en hydrate de chaux, on conçoit qu'il n'est pas impossible qu'elles jouent le même rôle que la chaux rendue insoluble par la silice ou par les pouzzolanes, et qu'ainsi on obtienne un commencement d'hydraulicité.

2° Dans les chaux hydrauliques imparfaitement calcinées, les particules de carbonate agissent de la même manière, mais avec cet avantage que leur influence sur la solidification est augmentée de toute celle du silicate de chaux qui existe en même temps.

Dans les mêmes calcaires portés au second maximum d'énergie, les particules de carbonate sont remplacées comme ci-dessus par des particules surcalcinées et également insolubles.

3° Dans les calcaires dits *rognons d'argile*, et fournissant les plâtres-ciments ordinaires, l'argile est trop abondante pour laisser, au terme de calcination complète, la proportion d'hydrate de chaux nécessaire à une bonne solidification; alors l'imparfaite calcination a pour objet de ne rendre la silice que partiellement soluble dans les acides, afin qu'elle se rapproche davantage du mode d'action des pouzzolanes.

Enfin, au terme de surcalcination, l'argile des mêmes calcaires passe à l'état de pouzzolane moins énergique qu'au terme de calcination complète, et laisse, par cela même, une plus grande proportion de chaux susceptible de se convertir en hydrate.

Les développements dans lesquels nous venons d'entrer, relativement à la solidification des mortiers en général, sont loin sans doute d'avoir épuisé la question, et auraient besoin d'être appuyés de nombreuses expériences. Nous le recon-

naissons tout le premier; mais notre but n'étant point de faire un traité des mortiers, nous avons dû nous borner à ce qui était utile pour faire bien comprendre les opérations de chaufournerie que nous avons décrites.

CHAPITRE VIII.

DE LA FABRICATION DE LA BRIQUE ET DES PROPRIÉTÉS QU'ELLE ACQUIERT PAR LA CUISSON.

Des divers argiles que l'on emploie.

§ 109. Nous avons parlé de la cuisson de la brique dans le quatrième chapitre : nous réserverons celui-ci pour divers détails qui se rattachent à la même question, et qui sont relatifs à la préparation de la brique, et à la connaissance des propriétés qu'elle acquiert par la cuisson.

On distingue plusieurs variétés de terres à briques, c'est-à-dire de terres propres au moulage, et susceptibles de prendre de la cohésion par l'action de la chaleur. Nous avons déjà fait remarquer (§ 61) qu'on pouvait les ranger en quatre catégories principales, savoir : en argiles réfractaires, en argiles ocreuses, en argiles calcaires et en argiles à la fois ocreuses et calcaires. Dans ces argiles, l'alumine est la base plastique; elle sert à donner du liant à la pâte; la chaux et l'oxide de fer n'agissent que comme fondants. On conçoit donc toute l'importance de connaître d'abord leur composition chimique; mais en outre, il faut tenir compte des mélanges accidentels de sable ou de débris végétaux qui peuvent modifier singulièrement leur manière d'être, et qui, par cela même, exigent qu'on commence toujours par faire quelques briques d'essai.

De l'influence des matières pulvérulentes mélangées avec l'argile.

§ 110. Les substances en poudre inerte, c'est-à-dire sans action chimique sur les éléments de l'argile, mêlées avec elle naturellement ou artificiellement, rendent la dessiccation plus rapide, modèrent le retrait, et par suite diminuent la déformation et les gerçures. Parmi ces substances inertes, les unes, telles que les herbes, la paille hachée, le brin de scie, &c., s'incinèrent par la calcination, rendent la brique poreuse, très-absorbante, et lui ôtent beaucoup de sa résistance à la rupture, sans influer cependant sur sa gelivité; les autres, telles que le sable quartzeux, le granit pilé, les roches non calcaires désagrégées, les scories de forge et même la poudre de coke ou de houille sèche, rendent la pâte plus courte et plus facile à manipuler, mais ne sont pas toutes également avantageuses. Nous verrons, par exemple, qu'entre le sable quartzeux dont on fait communément usage et le sable de gneiss qui nous sert à Brest, il y a une différence notable. Il faut en outre s'astreindre à certaines limites dans le dosage, parce que l'adhérence entre le sable et l'argile est beaucoup plus faible qu'entre les molécules mêmes d'argile. On voit, par la même raison, que, toutes choses étant égales d'ailleurs, les sables les plus fins sont les plus mauvais, car ils présentent la plus grande surface sous le même volume.

Expériences relatives au mélange des sables quartzeux.

§ 111. A l'appui de ces considérations, nous avons réuni dans le tableau suivant les résultats de quelques expériences sur les divers changements que le sable quartzeux apporte dans les propriétés de l'argile ocreuse de Brest, et sur les variations de retrait qui dépendent de l'intensité de cuisson à laquelle elle est soumise.

DÉSIGNATION DES RÉSULTATS.	ARGILE PURE gâchée en pâte bien ferme.	MÊME ARGILE pure.	1 D'ARGILE avec 1/4 sable quartzeux.	1 D'ARGILE avec 1/2 de sable.	1 D'ARGILE avec 1 de sable.	1 D'ARGILE avec 1 1/2 de sable.	1 D'ARGILE av. 2 de sablon très-fin.	MÊME ARGILE avec sablon.
Épaisseur des échantillons...	0^{m},015	0,030	0,027	0,027	0,040	0,037	0,032	0,050
Retrait par mètre courant, après 7 jours d'exposition à l'air, à la température de 14° R................	0^{m},045	0,030	0,045	0,0425	0,040	0,040	0,035	0,035
Retrait total après forte dessiccation...............	0,^{m}0715	0,0715	0,0715	0,060	0,050	0,0475	0,0365	0,0354
Rapport du 1er au 2e retrait, ou vitesse relative du retrait dans les premiers jours...	0,63	0,42	0,63	0,708	0,80	0,84	0,96	0,988
Allongement produit par la demi-cuisson............	0^{m},005	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,0044
Total du retrait depuis le moment de la fabrication jusqu'après bonne cuisson....	"	0^{m},090	0,100	0,083	0,068	0,050	0,0365	0,0365
Densité de la brique après demi-cuisson............	1,767	"	1,748	1,731	1,850	1,838	1,588	1,627
Idem après bonne cuisson...	1,952	1,828	1,912	1,842	1,878	1,830	1,649	"
Perte de poids en passant de l'état de brique bien sèche à l'état de brique demi-cuite	0,1228	0,1708	0,1240	0,1026	0,0947	0,0777	0,0509	0,1117
Augmentation de perte en passant à l'état de brique bien cuite..............	"	0,01	0,0124	0,000	0,0125	0,0104	"	0,0067
Résistance à la rupture après demi-cuisson, et par centimètre carré de section....	8^{k},636	7,809	4,872	4,164	2,619	1,701	<1,250	"
Idem après bonne cuisson...	33^{k},864	16,792	17,567	12,620	7,844	3,325	"	2,222
Proportion d'eau que la brique peut absorber après demi-cuisson	0,150	"	0,166	0,178	0,125	0,129	0,217	"
Idem après bonne cuisson...	0,104	0,145	0,109	0,127	0,119	0,131	0,177	"
Gerçures après la cuisson....	faibles.	faibles.	nulles.	nulles.	nulles.	nulles.	fortes.	fortes.

D'après cela, il devient évident que pour des objets moulés minces et de formes compliquées, comme sont les poteries, par exemple, on ne doit employer que des argiles pures, afin de conserver à la fois légèreté et solidité. Mais, pour les briques ordinaires, la solidité reste encore suffisante dans la plupart des applications, en mélangeant avec l'argile la moitié de son volume de sable.

De la manière d'apprêter l'argile au moulage.

§ 112. Le mélange du sable avec l'argile exige un apprêt spécial avant le moulage. Cet apprêt est également indispensable pour d'autres motifs: en effet, l'argile, telle que nous l'exploitons, soit dans la rade de Brest à marée basse, soit dans les terrains environnants, est en bloc plus ou moins desséchés, plus ou moins compactes, et contient souvent beaucoup de débris végétaux ou de galets. Il faut convertir ces blocs en une pâte ductile et bien homogène; pour cela, on les brise ou on les découpe en fragments de la grosseur du poing au plus; on les fait détremper, pendant 8 ou 10 jours, dans des bassins remplis d'eau; puis on les porte sur une aire en planches. Là, on les écrase soigneusement avec des rabots de maçon, et on fouette la pâte qui en résulte avec des espèces de bâtons en fer coudés en leur milieu, et faisant l'office de fléaux. On peut extraire en même temps tous les galets qui s'y trouvent, et dont le moindre inconvénient serait de rendre le moulage incommode, car les galets calcaires, par exemple, se convertissent en chaux par la cuisson, et cette chaux, par l'action inévitable de l'humidité, fuse et fait éclater la brique. C'est la même raison qui d'ailleurs doit faire proscrire l'emploi des sables coquillers au lieu de sables quartzeux ou granitiques.

Ce premier travail étant terminé, on procède à l'addition de la quantité de sable reconnue utile. Nos argiles en contenant très-peu à l'état naturel, nous employons, d'après ce qui a été dit précédemment, une mesure de sable pour deux

d'argile. Mais le sable dont nous nous servons exclusivement, parce qu'il se trouve en carrière tout à proximité de l'atelier, n'est pas purement quartzeux: c'est du même gneiss décomposé dont nous avons déjà parlé pour la préparation des pouzzolanes factices. Sa nature feldspathique lui donne la propriété de diminuer très-peu la cohésion dont l'argile pure est susceptible par une bonne cuisson; car, ainsi qu'on le verra plus loin, nos bonnes briques présentent jusqu'à 26 kil. de résistance à la rupture par centimètre carré.

Au lieu de faire détremper l'argile par immersion avant de la pétrir, il est un autre procédé suivi dans beaucoup de localités, et que des circonstances particulières peuvent rendre quelquefois très-avantageux. Il consiste à extraire l'argile en automne, à la laisser exposée aux intempéries de l'hiver, et même à renouveler les surfaces de contact avec l'air, en la bêchant à une ou plusieurs reprises. L'action alternative de la gelée et de l'humidité divise alors l'argile, et la réduit en pâte facile à travailler.

Enfin, quand on a besoin, pour certains objets, d'argile très-fine et bien purgée de tout mélange, on la délaye d'abord en bouillie claire dans une grande quantité d'eau, puis, après l'avoir laissée reposer un instant pour que les parties étrangères se déposent, on décante cette bouillie dans des bassins à grande surface et à fond perméable. L'eau s'infiltre à travers le fond ou s'évapore au contact de l'air, de telle sorte qu'au bout de 12 ou 15 jours, l'argile a repris une consistance suffisante pour le moulage.

Toutefois, les argiles éminemment plastiques ne se prêtent à cette manipulation qu'avec une extrême difficulté : l'argile commune de Brest est dans ce cas; et la seule sur laquelle nous puissions opérer avec succès nous vient de Roscanvel, dans l'un des coteaux qui avoisinent la rade. Cette argile est blanche, à pâte courte et un peu réfractaire.

Du moulage à la main et à l'aide de machines.

§ 113. Le moulage de la brique plate se fait dans de

petits cadres en bois de chêne solidement reliés par des équerres en fer, et garnis sur les bords supérieurs et inférieurs par une bande en tôle forte, afin que le moule ne s'use pas trop vite par le frottement presque continuel de la ratissette. Les détails de l'opération sont très-simples; ils ont d'ailleurs été exposés avec tant de soin dans l'ouvrage de M. Clère, qu'il devient inutile d'y insister ici.

Nos moules ont intérieurement 0^{m}, 247 de longueur, 0^{m}, 124 de largeur et 0^{m}, 055 de hauteur : ce sont là, par conséquent, les dimensions de la brique molle; mais, si l'on en déduit le retrait opéré par la dessiccation et la cuisson, on obtient assez régulièrement 0^{m}, 23, 0^{m}, 11, et 0^{m}, 05 pour longueurs d'arêtes d'un même angle solide; de sorte que deux épaisseurs de briques plus un joint font une largeur, et deux largeurs plus un joint font une longueur.

On a proposé diverses machines pour le moulage de la brique : nous les connaissons trop peu pour avoir une idée exacte de leurs avantages ou de leurs inconvénients. Leur usage ne paraît pas s'être introduit dans les grands ateliers de la Belgique et du nord de la France; mais, quoi qu'il en soit, nous sommes porté à penser que le moulage à la main est encore le plus simple et le meilleur, parce qu'il n'exige ni frais d'établissement, ni frais d'entretien appréciables, et qu'en définitive il n'entre que pour une faible partie dans le prix total de la brique.

Pour les briques creuses dont il a été mention dans le 4e chapitre, nous avons fait usage de la machine imaginée à Toulon par M. Raucourt (voir la 2e collection lithographique de l'*École des ponts et chaussées*, dessin n° 174). Nous devons dire cependant que nous ne sommes parvenu qu'incomplétement à éviter les défauts de soudure du couvercle et des angles, défauts qui avec cette espèce de briques entraînent dans des déchets onéreux. Nous avons même eu occasion de constater qu'une cuisson mal dirigée, qu'un feu trop brusqué contribuaient beaucoup à les manifester. Aussi, regardant

la brique creuse comme étant d'une fabrication moins économique et d'un succès plus incertain que la brique ordinaire, nous en restreignons l'usage à quelques cas où l'on recherche par-dessus tout la diminution de poids sous un volume constant.

Du rebattage de la brique.

§ 114. A sa sortie du moule, la brique toute molle encore est posée à plat sur un plancher recouvert de sable, ou sur une aire bien dressée. Au bout de quelques jours, quand elle a acquis un premier degré de consistance, on la relève de champ, afin de faciliter la dessiccation sur la face inférieure. Après un nouveau délai, suffisant pour qu'elle ne cède presque plus sous l'impression du doigt, on l'enlève pour la rebattre, puis la mettre en haie, ou pour la mettre en haie sans rebattage. Néanmoins, cette opération du rebattage est toujours utile; elle devient même indispensable quand la dessiccation a été très-prompte et inégale, et que la brique se trouve déformée. On y procède ordinairement en posant la brique sur un billot, et la frappant successivement sur toutes ses faces avec une petite batte en bois. Mais ce moyen, très-simple à la vérité, nous a toujours paru mal atteindre le but: il ne laisse pas que d'exiger beaucoup de main-d'œuvre; et, au lieu de conserver aux briques des dimensions uniformes, il arrive généralement qu'on les écrase, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

Un pareil résultat indique assez qu'on n'évite alors un inconvénient que pour tomber dans un autre. Nous avons cherché à y remédier à l'aide d'une petite machine construite d'après les mêmes principes que les balanciers à monnaie. Elle laisse peu de chose à désirer, soit pour la compression de l'argile, soit pour l'exacte uniformité des dimensions et la pureté géométrique des formes, soit enfin pour la rapidité d'exécution. Elle est fort peu encombrante, et on la transporte aisément d'une extrémité à l'autre de l'atelier. Enfin,

pour donner une idée exacte de son travail journalier, nous dirons qu'on peut rebattre une brique en 15″, ou 240 par heure; qu'un homme est nécessaire pour manœuvrer le moule qui reçoit la brique, un autre pour donner le coup de balancier, et un enfant pour apporter et emporter les briques au fur et à mesure.

Description du balancier à rebattre la brique.

§ 115. Donnons maintenant la description des diverses parties et du jeu de cette machine. Elle est représentée dans tous ses détails par les dix figures comprises depuis le n° 40 jusqu'au n° 49 inclusivement. La pièce principale est une vis en fer forgé portant quatre filets à pas carré. Comme dans les balanciers à monnaie, cette vis est ajustée à son extrémité supérieure avec un fléau portant deux lentilles en plomb, de manière à faire volant. Les écrous sont en cuivre, encastrés dans deux traverses de fer forgé; et celles-ci sont à leur tour encastrées dans deux montants en bois, qui réunissent invariablement le système au billot sur lequel se produit la compression. Pour que la brique ne s'affaisse pas outre mesure, elle est maintenue latéralement par un moule en fer. Ce moule a $0^{m},08$ de hauteur, et présente un rectangle intérieur de $0^{m},12$ sur $0^{m},245$, calculé sur le retrait de la brique depuis le moment du moulage. On le saisit et on l'enlève à volonté, au moyen de deux tiges ou poignées fixées dans le prolongement des grandes faces. Il porte des charnières aux deux extrémités opposées, de sorte qu'on peut l'ouvrir complétement. Quand il doit rester fermé, au moment de la percussion, on se sert d'une espèce de battant de loquet, fixé à charnière sur l'une des poignées, et retombant à mentonnet sur l'autre.

Ce moule étant posé sur le billot de la machine, on ne fait que l'entr'ouvrir un peu pour y jeter la brique, et on le referme ensuite. Mais, afin qu'il conserve toujours identiquement la même position, on cloue en saillie sur le billot

une plaque en tôle de 6 à 7 millimètres d'épaisseur, découpée en rectangle de $0^{m},12$ sur $0^{m},245$, de sorte qu'elle est enveloppée sans qu'il reste aucun vide, et par conséquent aucun dérangement possible.

La face supérieure de la brique reçoit seule le choc direct du balancier. Pour le répartir simultanément sur toute cette face, on a une forte plaque aciérée entrant dans le moule avec environ un demi-millimètre de jeu dans tout le pourtour. Cette plaque porte une anse fixée dans une gorge circulaire à l'extrémité inférieure de la vis, de sorte qu'elle monte ou descend avec elle, sans être obligée de suivre son mouvement de rotation. Il est même indispensable de s'y opposer d'une manière absolue; et c'est dans ce but que nous avons fait adapter à la même anse deux appendices réunis invariablement à deux guides verticaux passant à frottement doux dans les traverses qui soutiennent la vis elle-même. La brique étant donc mise dans le moule, l'impulsion brusque qui fait descendre la vis fait également descendre la plaque de compression dans la direction voulue. Dans cette circonstance, l'effort produit est tellement considérable, qu'un seul coup de balancier suffit pour chaque brique : aussi la plupart des pièces que nous venons de décrire ont-elles besoin d'être très-solides, pour ne point fléchir et se déformer.

Quand la brique est rebattue avant d'avoir acquis une forte consistance, la terre reflue par les interstices qui règnent tout autour de la plaque de compression, et elle adhère tellement contre les bords de cette plaque, qu'en faisant remonter la vis, la brique et le moule remonteraient aussi, et il y aurait perte de temps pour les retenir avec les mains ou les détacher. C'est pour obvier à cet inconvénient que le moule porte extérieurement deux languettes ou appendices sur ses grands côtés, et qu'à ces deux appendices correspondent deux clavettes logées à rainure dans les montants en bois, et que l'on pousse ou que l'on retire, suivant qu'on veut engager ou dégager le moule. Cette nouvelle manœuvre

retarde infiniment peu le rebattage, parce qu'elle se fait dans la durée du mouvement de la vis.

Enfin, pour opérer le plus commodément possible, l'ouvrier qui tient le moule est assis sur une sellette, et il a, à la hauteur du billot, un petit banc sur lequel il reçoit la brique qui vient d'être soumise à la compression.

De la fin du séchage, et de l'influence de la gelée.

§ 116. Nous avons dit qu'immédiatement après le rebattage on disposait les briques en haie. Elles sont alors assez solides pour être empilées; mais il est nécessaire de laisser entre chacune d'elles un intervalle libre pour la circulation de l'air qui doit compléter la dessiccation. Les haies peuvent être simples, doubles ou triples. Une haie simple se forme en posant des briques de champ, a environ $0^m,02$ l'une de l'autre, sur un même alignement, mais de manière que la longueur de la brique soit oblique à cet alignement. Sur un premier rang on en établit un second, dont les briques sont semblablement disposées entre elles, mais croisées avec celles du rang inférieur, et ainsi de suite pour tous les autres rangs. La longueur des haies est illimitée; mais on ne leur donne pas ordinairement plus de $1^m,20$ à $1^m,50$ de hauteur. On obtient ensuite une haie double ou triple, en adossant ensemble deux ou trois haies simples.

Il est impossible de donner aucun renseignement exact sur la durée totale du séchage. Dans le climat de Brest, il faut au moins deux mois avant qu'on puisse procéder à la cuisson. Mais, si l'on n'est pas pressé par le besoin du moment, on gagne à prolonger le séchage pendant six mois et même au-delà : la brique éclate moins au feu, elle peut supporter plus vite une haute température; on a par conséquent moins de chances de déchet.

Il est une dernière circonstance trop importante pour que nous l'omettions : nous voulons parler de l'effet de la gelée. Si la brique mal séchée ou mouillée accidentellement est

exposée à la gelée, elle se durcit et augmente de volume; mais au dégel elle se ramollit et se fendille de manière à ne pouvoir plus servir. Il faut alors la pétrir de nouveau et la soumettre à un second moulage. A mesure que la brique est plus sèche, cet effet devient moins sensible; mais il n'en résulte pas moins que la prudence veut qu'on suspende toute fabrication à l'approche de l'hiver, et qu'on ne se remette à l'œuvre qu'après le retour de la belle saison. Ce que nous disons ici, nous l'avons éprouvé plus d'une fois par expérience, quoique notre atelier soit sous un hangar bien clos.

Résistance de la brique à la rupture, eu égard au degré de cuisson, à la nature de l'argile et des substances mélangées avec elle.

§ 117. Nous n'avons plus à revenir sur ce qui concerne la cuisson; il nous reste donc maintenant à examiner les qualités de la brique obtenue, en ayant égard au degré de cuisson, à la nature de l'argile et des substances mélangées avec elle. Le tableau suivant donne les résistances à la rupture dans ces diverses circonstances.

NUMÉROS des échantill.	BRIQUES SOUMISES À L'ÉPREUVE.	LARGEURS.	ÉPAISSEURS.	POIDS qui ont causé la rupture.	DISTANCES à l'axe de rupture.	RÉSISTANCES par centimètre carré.
	ARGILE OCREUSE DE PLOUGASTEL mêlée avec 1/2 volume de sable de gneiss.	m.	m.	k.	m.	k.
1	Brique bien cuite	0,107	0,048	305,75	0,105	26,047
2	*Idem*....................	0,110	0,051	305,75	0,095	19,915
3	*Idem*....................	0,110	0,051	245,500	0,115	19,743
4	*Idem*....................	0,110	0,054	361,75	0,086	19,383
5	Brique passablement cuite....	0,074	0,051	207,00	0,075	16,172
6	*Idem*....................	0,054	0,052	147,00	0,075	15,110
7	*Idem*....................	0,110	0,047	187,00	0,095	14,326
8	*Idem*....................	0,112	0,054	185,500	0,115	13,087
9	Brique médiocrement cuite...	0,106	0,054	145,500	0,105	9,888
10	*Idem*....................	0,110	0,050	95,00	0,091	6,285
11	Brique très-peu cuite........	0,110	0,050	50,00	0,915	3,327
12	*Idem*....................	0,113	0,054	45,50	0,091	2,517

NUMÉROS des échantill^s.	BRIQUES SOUMISES À L'ÉPREUVE.	LARGEURS.	ÉPAISSEURS.	POIDS qui ont causé la rupture.	DISTANCES à l'axe de rupture.	RÉSISTANCES par centimètre carré.
	ARGILE OCREUSE DE LA RADE DE BREST, mêlée avec 1/2 volume de sable de gneiss.					
		m.	m.	k.	m.	k.
13	Brique bien cuite..........	0,107	0,050	265,50	0,110	21,835
14	*Idem*....................	0,106	0,048	225,50	0,110	20,331
15	*Idem*....................	0,108	0,051	225,50	0,110	18,720
16	*Idem*....................	0,108	0,048	205,50	0,110	18,171
17	Brique passablement cuite....	0,110	0,049	165,50	0,110	13,788
18	*Idem*....................	0,111	0,054	205,50	0,110	13,536
19	*Idem*....................	0,108	0,048	145,50	0,110	12,208
20	*Idem*....................	0,111	0,050	145,50	0,110	11,483
21	Brique médiocrement cuite..	0,110	0,054	95,50	0,091	5,414
22	Brique très-peu cuite........	0,116	0,048	45,50	0,091	3,101
23	*Idem*....................	0,113	0,051	45,50	0,091	2,816
24	*Idem*....................	0,118	0,059	45,50	0,091	2,014
	MÊME ARGILE mêlée avec 1/2 volume de sciure de bois.					
25	Brique très-cuite..........	0,106	0,053	165,50	0,091	10,108
26	*Idem*....................	0,111	0,050	145,50	0.091	9,560
27	Brique passablement cuite....	0,111	0,054	145,50	0,091	8,148
28	*Idem*....................	0,107	0,049	85,50	0,091	6,055
29	Brique peu cuite...........	0,113	0,050	84,50	0,078	4,661
30	*Idem* très-peu cuite.........	0,116	0,054	64,500	0,071	3,709
	BRIQUES BLANCHES DU HAVRE.					
31	Brique bien cuite...........	0,098	0,051	265,50	0,080	16,658
32	*Idem*....................	0,100	0,051	95,50	0,090	6,487
73	*Idem*....................	0,110	0,052	105,50	0,085	6,038
34	Briq. moins cuite en apparence.	0,100	0,050	85,50	0,075	5,130
35	*Idem*....................	0,104	0,050	65,50	0,090	4,535
36	*Idem*....................	0,102	0,053	65,50	0,085	3,893
	CARREAUX RÉFRACTAIRES DE NANTES.					
37	Carreau bien cuit en apparence.	0,114	0,056	145,50	0,090	7,336
38	Carreau moins cuit.........	0,100	0,055	55,50	0,090	3,308

On voit, d'après ce tableau, que les divers degrés de cuisson font varier la résistance des briques à la rupture dans des limites très-étendues; que nos briques d'argile de Plougastel ou d'argile marine ne donnent pas moins de 18 kilogrammes par centimètre carré, quand elles sont bien cuites; que l'argile de Plougastel paraît l'emporter un peu sur l'argile marine; que celle-ci mélangée de sciure de bois perd environ moitié de sa force, mais qu'avec le sable de gneiss elle donne des résultats bien supérieurs à ceux que nous avons trouvés pour les briques du Havre et de Nantes, choisies parmi les mieux cuites, autant du moins que la nature de l'argile permet d'en juger d'après l'apparence [1].

Résistance des mêmes matériaux à la gelée.

§ 118. Enfin, nous avons cherché à déterminer l'influence de la gelée sur ces mêmes matériaux, au moyen du procédé de M. Brard, qui consiste, comme on le sait, à remplacer l'action de l'eau congelée par la force de cristallisation du sulfate de soude. Ce procédé a été décrit et discuté avec beaucoup de soin, dans un rapport de M. Héricart de Thury à la Société d'encouragement : nous dirons donc seulement que, conformément aux prescriptions de ce rapport, nos échantillons ont été maintenus, pendant trente minutes, dans de l'eau bouillante contenant moitié de son poids de sulfate de soude; qu'après cela nous les avons suspendus à l'air libre, à une température moyenne de 12 degrés Réaumur, pendant sept jours et demi, les lavant matin et soir avec de l'eau pure, afin de détacher les efflorescences et de recueillir les parcelles de briques désagrégées par l'action du sulfate de soude. Le

[1] Voici quelques résultats qui peuvent servir de terme de comparaison entre la brique et les pierres de Brest :

Granit rose à grands cristaux de feldspath, résistance à la rupture par centimètre carré	$27^{k}90$
Granit blanc, à grains serrés	43, 95
Pierre, dite *Kersenton*	55, 17
Calcaire de la rade de Brest	61, 99

résultat de nos expériences est consigné dans le tableau suivant, dont la première colonne rappelle par numéros d'ordre les briques déjà mentionnées dans le § 117.

NUMÉROS des échantill.	RÉSISTANCES à la rupture.	POIDS avant l'immersion.	POIDS après l'immersion.	RAPPORTS des poids de liqueur absorbée aux poids des échantill.	DÉCHETS par l'action du sulfate de soude.	OBSERVATIONS.
	kil.	gr.	gr.		gr.	
1	27,047	237,80	277,20	0,165	0,105	Peut être considéré comme non gelif.
2	19,915	207,00	254,00	0,227	0,25	*Idem.*
3	19,743	258,00	291,50	0,129	0,17	*Idem.*
4	19,383	265,00	306,20	0,155	0,18	*Idem.*
5	16,172	235,00	278,30	0,184	0,16	*Idem.*
6	15,110	215,00	250,30	0,163	0,18	*Idem.*
7	14,326	226,50	255,00	0,126	0,18	*Idem.*
8	13,087	209,50	251,90	0,202	0,26	*Idem.*
9	9,888	132,10	156,80	0,87	0,51	Un peu gelif.
10	6,285	210,20	271,00	0,289	1,76	Gelif.
11	3,327	221,70	294,30	0,27	//	N'a résisté que 1 jour 1/2; est tombé en fragments.
12	2,517	218,20	//	//	//	S'est altérée déjà par l'ébullition; est tombée par fragments au bout de 1 jour.
13	21,835	223,20	244,50	0,095	0,11	Non gelif.
14	20,331	194,30	208,50	0,073	0,23	*Idem.*
15	18,720	256,00	281,50	0,100	0,23	*Idem.*
16	18,171	189,70	223,70	0,179	0,25	*Idem.*
17	13,788	241,60	273,20	0,130	0,35	*Idem.*
18	13,536	224,50	256,00	0,140	0,05	*Idem.*

NUMÉROS des échantill^{s}.	RÉSISTANCES à la rupture.	POIDS avant l'immersion.	POIDS après l'immersion.	RAPPORTS des poids de liqueur absorbée aux poids des échantill^{s}.	DÉCHETS par l'action du sulfate de soude.	OBSERVATIONS.
	kil.	gr.	gr.		gr.	
19	12,208	191,80	223,80	0,166	0,35	Non gelif.
20	11,483	222,50	260,50	0,170	0,16	*Idem.*
21	5,414	215,90	274,50	0,271	3,99	Gelif.
22	3,101	156,70	189,70	0,210	//	N'a duré que 1 jour 1/2.
23	2,816	175,50	213,70	0,217	//	N'a duré que 1 jour; devenu pâteux.
24	2,014	251,20	296,50	0,180	//	*Idem.*
25	10,108	154,50	182,30	0,180	0,11	Non gelif.
26	9,560	210,80	238,50	0,131	0,125	*Idem.*
27	8,148	200,00	279,00	0,395	0,17	*Idem.*
28	6,055	152,20	202,90	0,333	3,30	Gelif; s'est fendu en plusieurs endroits.
29	4,671	179,80	241,10	0,341	//	N'a duré que 1 jour; s'est fendu entièrement.
30	2,709	152,00	197,80	0,301	//	*Idem;* s'est ramolli extérieurement.
31	16,658	182,50	225,00	0,233	0,35	Non gelif.
32	6,487	156,30	193,40	0,237	0,58	Un peu gelif.
33	6,038	169,30	224,30	0,325	0,51	*Idem.*
34	5,130	157,00	221,50	0,411	0,35	Non gelif.
35	4,535	185,50	223,70	0,206	1,55	Gelif.
36	3,893	171,70	201,20	0,172	0,60	Un peu gelif.
37	7,336	258,20	314,20	0,217	2,78	Gelif.
38	3,308	257,20	305,00	0,186	21,70	Très-gelif.

Ce tableau fait voir que la brique de Brest provenant d'argile baignée ou non par la mer est peu gelive, tant que sa résistance à la rupture ne descend pas au-dessous de 8 à 9 kilogrammes par centimètre carré, c'est-à-dire tant qu'elle n'est pas au-dessous du degré de cuisson médiocre; qu'ensuite la brique du Havre, quoique beaucoup moins résistante à la rupture, est généralement peu gelive; qu'enfin les carreaux réfractaires de Nantes ne donneraient que de mauvais matériaux, si on ne les considérait que sous le rapport de la gelivité. Peut-être cela tient-il à ce que les échantillons que nous avions choisis n'avaient pas subi un assez fort degré de cuisson. Mais leur infusibilité et leur blancheur permanente rendent ce triage difficile à faire, tant qu'on n'a pour se guider que l'aspect de la cassure.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIER CHAPITRE.—Considérations générales sur la calcination des pierres calcaires et sur l'emploi des combustibles.

SECOND CHAPITRE. — De la forme et des dimensions les plus convenables pour les fours chauffés par le bois.

TROISIÈME CHAPITRE. — De l'emploi des fours à chaux déjà décrits et de leurs résultats.

QUATRIÈME CHAPITRE. — De la cuisson de la brique et de celle du plâtre.

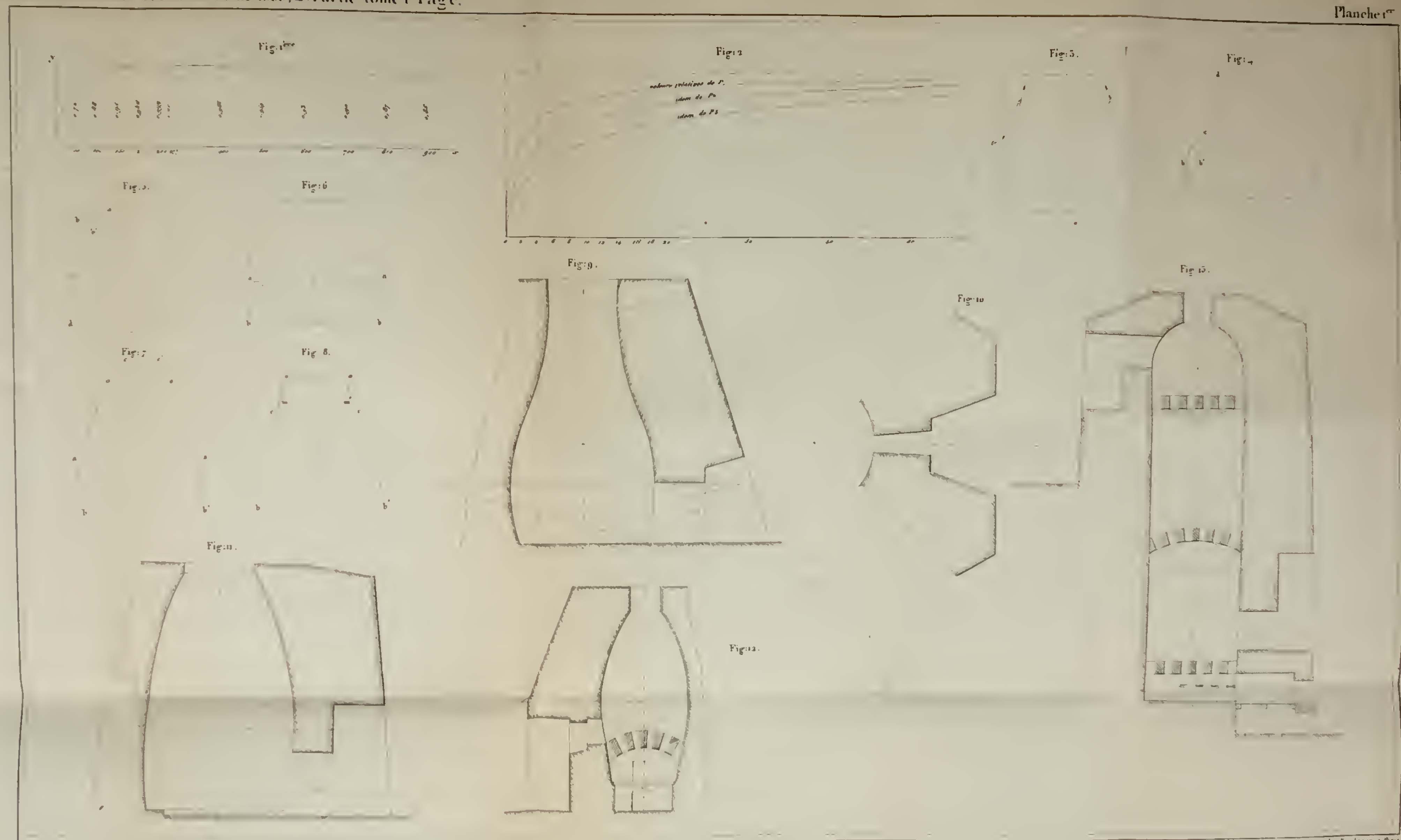
CINQUIÈME CHAPITRE. — De la préparation des pouzzolanes, et particulièrement de celle de sable de gneiss.

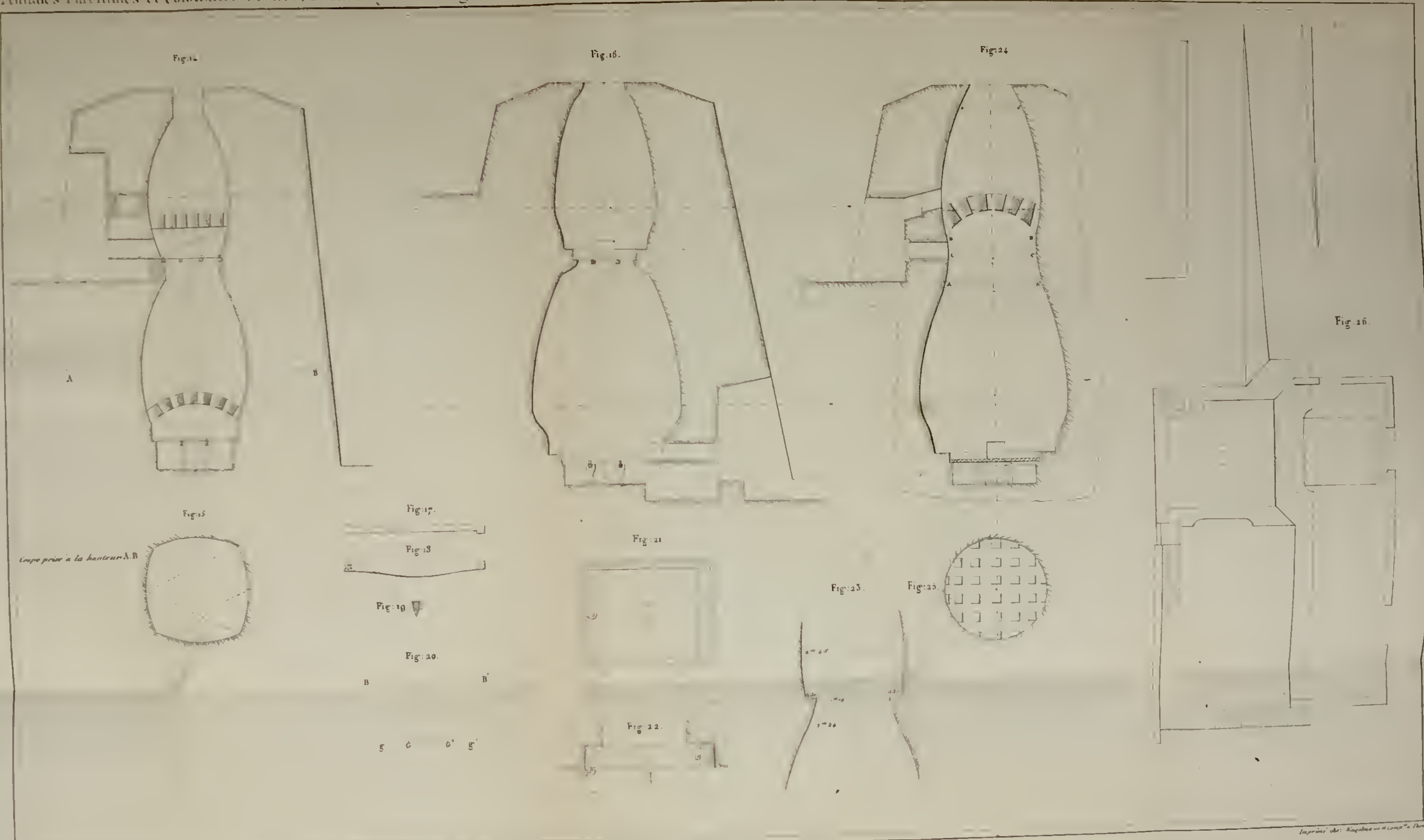
SIXIÈME CHAPITRE. — De la préparation, de la conservation et de l'emploi des plâtres-ciments.

SEPTIÈME CHAPITRE. — De l'altération des chaux hydrauliques et de la solidification des mortiers en général.

HUITIÈME CHAPITRE. — De la fabrication de la brique et des propriétés qu'elle acquiert par la cuisson.

Planche 1re


Fig: 1ère
Fig: 2
Fig: 3.
Fig: 4
Fig: 5.
Fig: 6
Fig: 7
Fig: 8.
Fig: 9.
Fig: 10
Fig: 11.
Fig: 12.
Fig: 13.


Fig:14
A
B
Fig:16
Fig:24
Fig:26
Fig:15
Coupe prise à la hauteur A.B
Fig:17
Fig:18
Fig:19
Fig:20
B
B'
Fig:21
Fig:22
Fig:23
Fig:25

FOUR À REVERBÈRE
pour la preparation des Pouzolanes factices.

Explication.

1 *Ouverture libre du cendrier.*
2 *Ouverture avec porte par laquelle on introduit le ringard.*
3 *Ouverture avec porte par laquelle on recharge la grille*
4. *Puisard dans lequel on fait tomber le sable torréfié.*
5. *Ouverture avec porte, pour visiter la base de la cheminée*
6 *Grille pour retenir le sable*
7 *Ouverture libre dans laquelle on introduit le sable*
8 *Espace rempli par le sable*
9. *Espace libre pour l'issue de la fumee.*
01. *Petite regards par lesquelle on introduit une tige en fèr pour forcer le sable à tombe.*

A

Niveau de la Tervasse

Fig. 29

Fig. 28

C

Coupe suivant AB.

Coupe suivant CD.

Niveau de la Tervasse

Fig. 30.

Detail des chassis de la porte N° 2
Elevation.

Fig. 34.

Plan.

Fig. 33

Plan du chassis de la porte N° 3

Fig. 32

B

Fig. 35

Fig. 36

Fig. 37.

Fig. 38.

Fig. 39

Fig. 27

A B

Coupe suivant E F

Fig. 31.

E

L'échelle est pour le Four de $0^{m}02$ p^{r} $1^{m}00$
pour les chassis de Fermeture de $0^{m}10$ p^{r} $1^{m}00$

Elévation vue de face.

Fig. 40.

Elevation vue de coté.

Fig. 42

Coupe transversale.

Fig. 43

Coupe perpendiculaire à la 1re

Fig. 44

Plan Fig. 41

Plan de la pièce qui relie la vis et les guides au plateau de compression

Fig. 46

Fig. 48

Plan et Coupe de la clavette destinée à maintenir le moule.

Fig. 48

Portion de vis Fig. 45

Plan du moule à Brique.

Fig. 47.

Echelle des plans et coupes de 0m 10 p. mètre

1 mètre

Echelle des détails de 0m 20 p. %

Portion de vis grandeur d'exécution

Imprimé chez Engelmann

